



TUGAS AKHIR – MO.141326

**ANALISA PENGARUH *POST WELD HEAT TREATMENT* TERHADAP  
TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA SAMBUNGAN TUBULAR  
MULTIPLANAR TIPE-K DENGAN MENGGUNAKAN *FINITE  
ELEMENT METHOD***

SEPTIAN FAJAR UTOMO

NRP. 4312100054

Dosen Pembimbing :

Nur Syahroni, S.T., MT., Ph.D

Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2017



**FINAL PROJECT – MO.141326**

**ANALYSIS OF POST WELD HEAT TREATMENT EFFECT TO  
RESIDUAL STRESS AND DISTORTION ON TYPE-K  
MULTIPLANAR TUBULAR JOINT USING FINITE ELEMENT  
METHOD**

**SEPTIAN FAJAR UTOMO**

**NRP. 4312100054**

**Supervisors :**

**Nur Syahroni, S.T., MT., Ph.D**

**Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.**

**DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING**

**Faculty of Marine Technology**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya**

**2017**





## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISA PENGARUH *POST WELD HEAT TREATMENT* TERHADAP TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA SAMBUNGAN TUBULAR MULTIPLANAR TIPE-K DENGAN MENGGUNAKAN *FINITE ELEMENT METHOD*

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**SEPTIAN FAJAR UTOMO**

NRP. 4312 100 054

Disetujui oleh:

1. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing 1)  
.....
2. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 2)  
.....
3. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc., Ph.D. (Penguji 1)  
.....
4. Ir. Mas Murtedjo, M.Eng. (Penguji 2)  
.....
5. Ir. Imam Rochani, M.Sc. (Penguji 3)  
.....

SURABAYA, JANUARI 2017



*(halaman sengaja dikosongkan)*

**ANALISA PENGARUH *POST WELD HEAT TREATMENT* TERHADAP  
TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA SAMBUNGAN TUBULAR  
MULTIPLANAR TIPE-K DENGAN MENGGUNAKAN *FINITE  
ELEMENT METHOD***

**Nama Mahasiswa** : Septian Fajar Utomo  
**NRP** : 4312100054  
**Jurusan** : Teknik Kelautan – FTK ITS  
**Dosen Pembimbing** : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D  
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

**ABSTRAK**

Perkembangan teknologi industri migas sudah sangat maju diantaranya dalam hal fabrikasi, salah satu penerapan yang dilakukan adalah penyambungan bahan-bahan material untuk menunjang fasilitas industri migas. Tegangan sisa dapat terjadi karena adanya perbedaan temperatur yang tinggi akibat pengelasan dan juga distribusi panas yang tidak merata. Ditambah laju pendinginan yang cepat mengakibatkan adanya perubahan mikro-struktur pada daerah lasan dan HAZ. Hal tersebut menyebabkan material menjadi keras tetapi rapuh (getas) sehingga dapat menyebabkan kegagalan struktur pada daerah sambungan tersebut. Dalam tugas akhir ini akan dilakukan simulasi pengelasan sambungan tubular multiplanar tipe-K untuk mengetahui tegangan sisa yang terjadi serta pengaruh Post Weld Heat Treatment terhadap tegangan sisa itu sendiri. Material yang digunakan yaitu jenis API 5L X52 serta data WPS yang berasal dari perusahaan fabrikator. Simulasi terbagi dalam 2 langkah yaitu analisa thermal dan struktural. Variasi yang digunakan dalam simulasi ini adalah urutan pengelasan brace yang terdiri dari 4 Loadcase. Nilai dari tegangan sisa maksimal yang terkecil yaitu 319.44 Mpa yang merupakan Loadcase 4 dengan urutan pengelasan simultan 4 brace secara bersamaan dengan total deformasi pada ujung brace sebelah kiri adalah sebesar 0,24 m. Kemudian dilakukan analisa Post Weld Heat Treatment yang mengacu pada AWS D1.1:2000 untuk mengurangi tegangan sisa yang terjadi. Dari hasil Post Weld Heat Treatment tersebut nilai dari tegangan sisa dapat diturunkan secara signifikan. Sebelum dilakukan PWHT nilai tegangan sisa maksimal dari tiap-tiap loadcase didapat secara berturut-turut 347.21 MPa, 341.08 MPa, 326.9 MPa, dan 319.44 MPa. Setelah diberi perlakuan Post Weld Heat Treatment dengan variasi suhu sebesar 528 K, 625K, dan 700K, pengurangan tegangan sisa maksimal terbesar terjadi pada loadcase 1 sebesar 246.41 MPa dari tegangan sisa sebelum PWHT. Sedangkan pengurangan tegangan sisa maksimal terkecil pada loadcase 4 dengan penurunan sebesar 224.88 MPa pada suhu tahan PWHT 700K.

**Kata Kunci** : Sambungan tubular, multiplanar, tipe-K, tegangan sisa, distorsi, post weld heat treatment, Urutan pengelasa

*(halaman sengaja dikosongkan)*



**ANALYSIS OF POST WELD HEAT TREATMENT EFFECT TO  
RESIDUAL STRESS AND DISTORTION ON TYPE-K MULTIPLANAR  
TUBULAR JOINT USING FINITE ELEMENT METHOD**

**Name** : Septian Fajar Utomo  
**REG.** : 4312100054  
**Department** : Teknik Kelautan FTK-ITS  
**Supervisors** : Nur Syahroni, S.T., MT., Ph.D  
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

**ABSTRACT**

The development of technology has greatly advanced of oil and gas industry, including in terms of fabrication, one application does is grafting construction materials to support the oil and gas industry facilities. Residual stress may occur due to high temperature differences as a result of welding and uneven heat distribution and rapid cooling rate results in a change in the micro-structure of the weld region and HAZ. This caused the material becomes hard but brittle so it can cause structural failure in the connection area. In this final project will be simulated welding-type connection multiplanar tubular K to determine residual stresses that occur as well as the influence of Post Weld Heat Treatment of the residual stress. Material used is API 5L X52 and the data derived from the company's WPS fabricator. Simulation is divided into two steps, namely thermal and structural analysis. Variations used in this simulation is a brace welding sequence consisting of 4 Loadcase. The results of the maximum residual stress smallest of 319.44 MPa which is Loadcase 4 with 4 simultaneous welding sequence brace simultaneously with the total deformation at the end of the brace left side is 0.24 m. And then analyzed Post Weld Heat Treatment referring to the AWS D1.1: 2000 to reduce residual stress. From the results of Post Weld Heat Treatment of the value of the residual stress can be reduced significantly. Before the PWHT, the maximum value of residual stress of each loadcase obtained respectively 347.21 MPa, 341.08 MPa, 326.9 MPa and 319.44 Mpa. After being treated Post Weld Heat Treatment with variation the temperature by 528 K, 625K, and 700K, the largest reduction in the maximum residual stress occurs in Loadcase 1 amounted to 246.41 MPa before PWHT and the smallest reduction of the maximum residual stress in the loadcase 4 is 224.88 MPa at a hold temperature of 700K PWHT's.

**Keywords** : Tubular Joint, Multiplane, type-K, Residual Stress, Distortion, post weld heat treatment, Welding Sequence.

*(halaman sengaja dikosongkan)*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur Alhamdulillah penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan akhir Tugas Akhir dengan judul “Analisa Pengaruh Post Weld Heat Treatment terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi pada Sambungan Tubular Multiplanar Tipe-K dengan Menggunakan Finite Element Method”.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini membahas tentang analisa tegangan sisa dan distorsi dengan pengaruh Post Weld Heat Treatment.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dari laporan ini, baik dari materi maupun teknik penyajiannya mengingat kurangnya pengetahuan dan pengalaman penulis. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan.

Untuk itu semoga dalam laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan juga dapat menambah ilmu pengetahuan yang terkait bagi para pembaca.

Surabaya, 2017

Septian Fajar Utomo



*(halaman sengaja dikosongkan)*

## UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan kali ini, Penulis menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan Tugas akhir ini baik dukungan secara moril dan materi, diantaranya kepada :

1. Allah SWT atas semua keberkahan dan kemudahan dalam mengerjakan dan menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang tua penulis yang secara tulus ikhlas memberikan doa dan dukungan sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai dengan lancar.
3. Bapak Nur Syahroni S.T.,M.T.,Ph.D selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan ilmu dan pebimbingan dalam penyelesaian Tugas Akhir
4. Bapak Ir. Handayanu., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan ilmu dan pebimbingan dalam penyelesaian Tugas Akhir
5. Bapak Haryo Dwito Armono S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen wali selama masa perkuliahan di ITS – Surabaya
6. Bapak-bapak dosen penguji selama proses sidang proposal sampai sidang akhir berlangsung.
7. Karyawan Tata Usaha Jurusan Teknik Kelautan ITS atas bantuan administrasi yang diberikan kepada penulis.
8. Teman-teman Tugas Akhir bimbingan Bapak Nur Syahroni S.T.,M.T.,Ph.D baik periode sekarang maupun semester lalu.
9. Teman-teman ruangan puslit kelautan ITS atas kerjasamanya dalam pengerjaan tugas akhir ini hingga dapat terselesaikan.
10. Teman-teman sejawat angkatan 2012 (Varuna) Teknik Kelautan ITS

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada seluruh pihak yang secara langsung maupun tak langsung turut membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

*(halaan sengaja dikosongkan)*



## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT .....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
UCAPAN TERIMA KASIH .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. LATAR BELAKANG MASALAH .....	1
1.2. PERUMUSAN MASALAH .....	2
1.3. TUJUAN .....	2
1.4. MANFAAT .....	2
1.5. BATASAN MASALAH .....	3
1.6. SISTEMATIKA PENULISAN .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	5
2.1. TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.2. DASAR TEORI .....	6
2.2.1. PENGELASAN .....	6
2.2.2. SIKLUS TERMAL PENGELASAN .....	7
2.2.3. TEGANGAN SISA .....	10
2.2.4. DEFORMASI PADA PENGELASAN .....	14
2.2.5. POST WELD HEAT TREATMENT .....	16
2.2.6. METODE ELEMEN HINGGA .....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	27
3.1. METODE PENELITIAN .....	27
3.2. PENJELASAN DIAGRAM ALIR PENELITIAN .....	29
3.2.1. STUDI LITERATUR JURNAL .....	29
3.2.2. PENGUMPULAN DATA .....	29

3.2.3.	PERMODELAN GEOMETRI .....	29
3.2.4.	INPUT HASIL PERMODELAN GEOMETRI SAMBUNGAN TUBULAR MULTIPLANAR TIPE K KE SOFTWARE ANSYS .....	29
3.2.5.	ANALISA THERMAL STRUKTUR MENGGUNAKAN SOFTWARE ANSYS MECHANICAL APDL 16.0 .....	29
3.2.6.	ANALISA STRUKTURAL MENGGUNAKAN SOFTWARE ANSYS MECHANICAL APDL 16.0.....	29
3.2.7.	VALIDASI HASIL TEGANGAN SISA KONDISI <i>AS-WELDED</i>	30
3.2.8.	VARIASI WAKTU TAHAN DAN SUHU POST WELD HEAT TREATMENT .....	30
3.2.9.	ANALISA DAN PEMBAHASAN .....	30
3.2.10.	KESIMPULAN .....	30
3.3.	PERMODELAN TERMAL DAN PERMODELAN STRUKTUR .....	30
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN .....		39
4.1.	PERMODELAN STRUKTUR.....	39
4.2.	CHECK TUBULAR JOINT SESUAI DENGAN API RP 2A .....	40
4.3.	MESHING.....	42
4.4.	PERHITUNGAN BEBAN HEAT FLUX .....	43
4.5.	VARIASI URUTAN DAN AREA PENGELASAN .....	48
4.6.	HASIL ANALISA <i>THERMAL</i> .....	53
4.6.1.	DISTRIBUSI PANAS <i>LOAD CASE 1</i> .....	54
4.6.2.	DISTRIBUSI PANAS <i>LOAD CASE 2</i> .....	54
4.6.3.	DISTRIBUSI PANAS <i>LOAD CASE 3</i> .....	55
4.6.4.	DISTRIBUSI PANAS <i>LOAD CASE 4</i> .....	56
4.7.	HASIL ANALISA TEGANGAN SISA.....	56
4.7.1.	DISTRIBUSI TEGANGAN SISA AKSIAL <i>LOAD CASE 1</i> .....	57
4.7.2.	DISTRIBUSI TEGANGAN SISA AKSIAL <i>LOAD CASE 2</i> .....	58
4.7.3.	DISTRIBUSI TEGANGAN SISA AKSIAL <i>LOAD CASE 3</i> .....	59
4.7.4.	DISTRIBUSI TEGANGAN SISA AKSIAL <i>LOAD CASE 4</i> .....	60
4.8.	VALIDASI HASIL TEGANGAN SISA AKSIAL.....	61
4.9.	ANALISA TOTAL DEFORMASI .....	63
4.10.	ANALISA TEGANGAN SISA SETELAH POST WELD HEAT TREATMENT .....	63
BAB V PENUTUP .....		69

5.1. KESIMPULAN.....	69
5.2. SARAN .....	69
DAFTAR PUSTAKA .....	71
LAMPIRAN	
BIOGRAFI PENULIS	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Siklus termal selama proses pengelasan (AWS vol I, 1996) .....	7
Gambar 2. 2 Pembentukan tegangan sisa (Wiryosumarto, 2010) .....	11
Gambar 2. 3 Distribusi tegangan sisa pada las melingkar pada pipa (Wiryosumarto, 2010) .....	12
Gambar 2. 4 Distribusi tegangan sisa pada las berbentuk lingkaran (Wiryosumarto, 2010) .....	12
Gambar 2. 5 Skema distribusi tegangan sisa dalam sambungan las tumpul (Wiryosumarto, 2010) .....	12
Gambar 2. 6 Urutan pengelasan pada plat (Wiryosumarto, 2010) .....	14
Gambar 2. 7 Urutan pengelasan melingkar menerus, simetri, dan loncat .....	14
Gambar 2. 8 Macam-macam distorsi pada pengelasan .....	15
Gambar 2. 9 <i>Heating Treatment Diagram</i> (Total E&P Indoensie 2011) .....	19
Gambar 2. 10 Contoh pendiskritan tubular joint ( <a href="http://alitputraiputu.blogspot.co.id/">http://alitputraiputu.blogspot.co.id/</a> ) .....	20
Gambar 2. 11 Geometri Elemen SOLID70 .....	21
Gambar 2. 12 Bentuk elemen yang dapat dibentuk SOLID 45 .....	22
Gambar 3. 1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir .....	27
Gambar 3. 2 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (lanjutan) .....	28
Gambar 3. 3 Diagram Alir Analisa Thermal .....	31
Gambar 3. 4 Diagram Alir Analisa Thermal (lanjutan) .....	32
Gambar 3. 5 Diagram Alir Analisa Struktural .....	35
Gambar 4. 1 Model Geometri Sambungan Tubular Multiplanar tipe K .....	40
Gambar 4. 2 Referensi Standar Tubular Joint API RP2A .....	40
Gambar 4. 3 Validity Range Tubular Joint API RP2A .....	41
Gambar 4. 4 Hasil Meshing Sambungan dengan ANSYS 16.2 .....	43
Gambar 4. 5 Urutan Simulasi Pengelasan pada Brace .....	48
Gambar 4. 6 Pembagian Area Pengelasan pada Brace 1 dan 3 .....	49
Gambar 4. 7 Pembagian Area Pengelasan pada Brace 2 dan 4. ....	49
Gambar 4. 8 Ilustrasi Pengelasan pada Software ANSYS APDL 16.2 .....	53
Gambar 4. 9 Distribusi Panas Kondisi Akhir/Pendinginan .....	54
Gambar 4. 10 Distribusi Temperatur pada <i>LoadStep</i> 1 .....	54
Gambar 4. 11 Distribusi Temperatur pada <i>LoadStep</i> 1 .....	55
Gambar 4. 12 Distribusi Temperatur pada <i>LoadStep</i> 1 .....	55
Gambar 4. 13 Distribusi Temperatur pada <i>LoadStep</i> 1 .....	56
Gambar 4. 14 Pathline pada Chord untuk Pembacaan Tegangan Sisa .....	57
Gambar 4. 15 Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 1 – Loadcase 1 .....	57
Gambar 4. 16 Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 2 – Loadcase 1 .....	58

Gambar 4. 17 Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 1 – Loadcase 2 .....	58
Gambar 4. 18 Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 2 – Loadcase 2 .....	59
Gambar 4. 19 Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 1 – Loadcase 3 .....	59
Gambar 4. 20 Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 2 – Loadcase 3 .....	60
Gambar 4. 21 Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 1 – Loadcase 4 .....	60
Gambar 4. 22 Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 2 – Loadcase 4 .....	61
Gambar 4. 23 Model geometri yang digunakan untuk validasi G.C. Jang dkk (2007) .....	62
Gambar 4. 24 Grafik Validasi Tegangan Sisa Aksial untuk Loadcase 1 Pathline 2 .....	62
Gambar 4. 25 Total deformasi pada loadcase 4 .....	63
Gambar 4. 26 Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Loadcase 1 - Pathline 1 .....	64
Gambar 4. 27 Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Loadcase 1 - Pathline 2 .....	65
Gambar 4. 28 Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Loadcase 2 - Pathline 1 .....	65
Gambar 4. 29 Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Loadcase 2 - Pathline 2 .....	66
Gambar 4. 30 Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Loadcase 3 – Pathline 1 .....	66
Gambar 4. 31 Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Loadcase 3 – Pathline 2 .....	67
Gambar 4. 32 Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Loadcase 4 – Pathline 1 .....	67
Gambar 4. 33 Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Loadcase 4 – Pathline 2 .....	68



## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Minimum Holding Time</i> .....	17
Tabel 2. 2 <i>Alternate Stress-Relief Heat Treatment</i> .....	18
Tabel 4. 1 Ukuran Geometri Sambungan Tubular Multiplanar tipe-K .....	39
Tabel 4. 2 Parameter Pengelasan .....	43
Tabel 4. 3 Loadstep dan Area Pengelasan Loadcase 1 .....	49
Tabel 4. 4 Loadstep dan Area Pengelasan Loadcase 2 .....	51
Tabel 4. 5 Loadstep dan Area Pengelasan Loadcase 3 .....	51
Tabel 4. 6 Loadstep dan Area Pengelasan Loadcase 4 .....	52
Tabel 4. 7 Total deformasi tiap-tiap loadcase.....	63
Tabel 4. 8 Variasi Suhu dan Waktu Tahan Post Weld Heat Treatment .....	64

## **DAFTAR LAMPIRAN**

### **LAMPIRAN A**

PROSES Pengerjaan Analisa Thermal dengan Software  
ANSYS APDL 16.2 Mechanical

### **LAMPIRAN B**

PROSES Pengerjaan Analisa Structural dengan  
Software ANSYS APDL 16.2 Mechanical

### **LAMPIRAN C**

Input File Analisa Thermal pada Software ANSYS  
Mechanical APDL 16.2

### **LAMPIRAN D**

Input File Analisa Structural pada Software ANSYS  
Mechanical APDL 16.2

### **LAMPIRAN E**

Data Parameter Pengelasan berdasarkan Welding  
Procedure Specification (WPS)

*(halaman sengaja dikosongkan)*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. LATAR BELAKANG MASALAH**

Saat ini kebutuhan akan migas terus meningkat. Seiring dengan bertambahnya populasi manusia yang tentu juga akan semakin bertambahnya kebutuhan energi. Hal tersebut membuat kegiatan eksplorasi minyak dan gas bumi akan terus mengalami peningkatan disamping belum adanya energi alternatif yang dapat menggantikan minyak dan gas bumi secara fungsi dan ekonomis. Dengan adanya bangunan lepas pantai maka akan membantu dalam pengambilan minyak dan gas bumi yang ada di dalam reservoir. Terdapat bagian-bagian yang penting dari struktur jacket itu sendiri diantaranya adalah struktur tubular yang berfungsi untuk menahan serta memperkuat struktur tersebut.

Dalam proses fabrikasi jacket platform tentu akan digunakan pengelasan dalam menyambung antar member dan brace tersebut. Saat ini pengelasan banyak digunakan pada industri fabrikasi termasuk penyambungan logam-logam tertentu. Pengelasan adalah proses penyambungan 2 (dua) logam atau lebih dengan menggunakan energi panas. Aspek-aspek pendekatan dalam pengelasan meliputi tiga komponen yang berhubungan yaitu termal, transformasi fasa, dan fenomena mekanik. Karena kompleksitas interaksi dari tiga komponen yang berhubungan ini, beberapa peneliti cenderung mempertimbangkan *thermomechanical coupling* (Bang dkk., 2002) tetapi untuk beberapa situasi transformasi fasa juga perlu diperhatikan (Zacharia dkk, 1995). Untuk pertimbangan *thermomechanical coupling* dengan cara numerik dapat dilakukan analisa termal dan analisa mekanik, dengan hasil berupa tegangan sisa. Karena proses pengelasan maka logam di sekitar daerah las-lasan akan mengalami perubahan sifat material, deformasi, serta tegangan-tegangan termal yang diakibatkan oleh laju pemanasan dan pendinginan (siklus termal) yang sangat cepat. Dalam proses pengelasan bagian yang dilas menerima panas pengelasan lokal dan selama proses berjalan suhunya selalu berubah sehingga distribusi panas tidak merata. Karena panas tersebut, maka pada bagian yang dilas terjadi pengembangan termal. Sedangkan bagian yang dingin tidak berubah sehingga terbentuk penghalangan pengembangan yang

mengakibatkan terjadinya peregangan. Regangan ini akan menyebabkan terjadinya perubahan bentuk tetap yang disebabkan karena adanya perubahan besaran mekanik. Disamping perubahan bentuk yang dengan sendirinya terjadi regangan maka terjadi juga tegangan yang sifatnya tetap yang disebut tegangan sisa. Tegangan sisa dan perubahan bentuk yang terjadi sangat mempengaruhi sifat dan kekuatan sambungan hasil pengelasan.

Terdapat beberapa metode untuk mengurangi tegangan sisa hasil proses pengelasan yaitu *post-welding*, *pre-welding*, *hammering*, dan pemilihan siklus pengelasan. Salah satunya adalah *Post Weld Heat Treatment*, proses ini dilakukan dengan menerapkan panas *uniform* di daerah las dan sekitarnya selama waktu tahan tertentu. Parameter temperatur dan waktu tahan yang digunakan tergantung pada komposisi *base metal* dan *weld metal*. Hal ini akan mempengaruhi perubahan mikrostruktur yang mana akan berdampak pada sifat mekanik sambungan las. Tergantung pada temperatur PWHT dan teknik yang digunakan, penghilangan tegangan sisa secara menyeluruh dapat tercapai.

Oleh sebab itu dalam tugas akhir ini penulis ingin menganalisa pengaruh perlakuan panas setelah proses pengelasan atau *Post Weld Heat Treatment* terhadap tegangan sisa yang terjadi pada sambungan tubular multiplanar tipe K hasil pengelasan sehingga dapat diketahui pengurangan tegangan sisa

## **1.2. PERUMUSAN MASALAH**

1. Bagaimana tegangan sisa dan distorsi sambungan tubular multiplanar hasil pengelasan pada kondisi as-welded ?
2. Bagaimana tegangan sisa sambungan tubular multiplanar hasil pengelasan pada kondisi setelah diberi perlakuan *Post Weld Heat Treatment* ?

## **1.3. TUJUAN**

1. Mengetahui tegangan sisa dan distorsi sambungan tubular multiplanar hasil pengelasan pada kondisi as-welded.
2. Mengetahui tegangan sisa sambungan tubular multiplanar hasil pengelasan pada kondisi setelah diberi perlakuan *Post Weld Heat Treatment*.

## **1.4. MANFAAT**

Manfaat dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi pengetahuan dalam proses pengelasan sambungan tubular khususnya dalam aspek perhitungan

tegangan sisa dan distorsi serta *Post Weld Heat Treatment* sebagai salah satu metode untuk mengurangi tegangan sisa.

### **1.5. BATASAN MASALAH**

Batasan masalah dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah :

1. Spesifikasi material yang digunakan adalah API 5L X52
2. Jenis sambungan adalah sambungan tubular multiplanar tipe K
3. Data Jacket menggunakan PHE24 CPP Platform dari PT. Gunanusa Utama Fabricator
4. Prosedur pengelasan sesuai dengan WPS (*Welding Procedure Spesification*) menggunakan data dari PT. Gunanusa Utama Fabricator
5. *Pre heating* tidak dilakukan dalam proses pengelasan
6. Filler metal tidak dimodelkan
7. Proses modeling menggunakan bantuan software Solidwork 2014
8. Proses running dan analisa menggunakan bantuan software ANSYS 16.0
9. Pengaruh aliran panas radiatif diabaikan
10. Logam pengisi tidak dimodelkan
11. Kode dasar yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah American Welding Society – Structural Welding Code Steel AWS D.1.1

### **1.6. SISTEMATIKA PENULISAN**

Sistematika penulisan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang penelitian yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai dalam penulisan tugas akhir, manfaat yang diperoleh, serta ruang lingkup penelitian untuk membatasi analisis yang dilakukan dalam tugas akhir.

#### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Bab ini berisi referensi dan juga teori-teori pendukung yang digunakan sebagai acuan atau pedoman dalam menyelesaikan tugas akhir. Referensi tersebut bersumber pada jurnal lokal maupun internasional, literatur, rules/code dan juga buku yang berkaitan dengan topik yang dibahas.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini berisi tentang alur pengerjaan tugas akhir dengan tujuan untuk memecahkan masalah yang diangkat dalam bentuk diagram alir atau flow chart yang disusun secara sistematis yang dilengkapi pula dengan data data penelitian serta penjelasan detail untuk setiap langkah pengerjaannya.

### **BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini menjelaskan tentang pengolahan data yang diperoleh, kemudian pemodelan struktur menggunakan *software* ANSYS Mechanical APDL 16.2. Selanjutnya, dalam bab ini juga dilakukan pembahasan dan pengolahan output yang diperoleh dari running software secara termal yang mencakup analisis distribusi panas lalu diubah ke tegangan panas dan tegangan struktur.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi kesimpulan yang merupakan uraian singkat dari keseluruhan hasil analisis. Uraian singkat ini diharapkan bisa menjawab rumusan masalah yang ada pada Bab I. Pada bab ini juga berisikan saran yang bermanfaat guna keberlanjutan penelitian terkait kedepannya.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1. TINJAUAN PUSTAKA**

Salah satu akibat dari proses pengelasan adalah adanya tegangan sisa. Hal tersebut dapat mengubah karakteristik dari material sehingga dapat mempengaruhi kekuatan material itu sendiri, akibatnya kekuatan material menjadi berkurang. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menganalisa besarnya tegangan sisa yang terjadi akibat pengelasan baik secara numerik maupun eksperimen. Cara numerik dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan software seperti ANSYS dan ABAQUS. Simulasi numerik dapat dilakukan dengan menampilkan kode elemen hingga ANSYS (ANSYS,2010), dengan menerapkan komponen thermal dan komponen mekanik elemen untuk diskritisasi.

Salah satu studi eksperimen yang dilakukan oleh Guangming Fu dkk (2014) meneliti tentang efek dari syarat batas (boundary conditions) terhadap tegangan sisa dan distorsi pada sambungan plat dengan tipe T. Dari hasil eksperimen ini menunjukkan bahwa tegangan sisa transversal, vertical displacement, dan angular distortion sangat dipengaruhi oleh syarat batas mekanik sedangkan tegangan sisa secara memanjang (longitudinal residual stress) tidak berubah secara signifikan terhadap syarat batas mekanik. Distorsi yang disebabkan oleh pengelasan tidak hanya mempengaruhi penampilan struktur tetapi juga menurunkan kinerja karena hilangnya integritas struktural dan akurasi dimensi (Gannon et al.,2016). Oleh karena itu penting untuk memprediksi distorsi yang disebabkan oleh pengelasan pada tahap desain kapal dan lepas pantai struktur untuk tujuan mengendalikan distorsi seperti dalam produksi dan meminimalkan biaya produksi (Conrardy, et al. 2006). Gannon et al. (2012) mempelajari pengaruh urutan pengelasan pada distribusi tegangan sisa dan distorsi datar bar kaku piring berdasarkan simulasi FEM

Deng et al. (2013) menyelidiki distorsi pengelasan dari pelat tipis dengan metode elemen hingga elasto-plastik termal (FEM) dan membahas karakteristik buckling dan mode deformasi joint . Sedangkan penelitian tentang perlakuan panas dilakukan oleh Achmad Arifin (2012). Dalam penelitian tersebut bertujuan



mempelajari pengaruh preheat pada perubahan microstructure dan sifat mekanis yang berupa kekerasan, ketangguhan, dan kekuatan tarik. Material superheater berupa pipa baja paduan 12Cr1MoV dengan diameter 2,5 inch dan ketebalan 9,1 mm. Pengelasan menggunakan las GTAW, filler ER80SG, arus 110 Ampere dan tegangan 15 Volt. Temperatur preheating digunakan : 150oC, 200oC, 250oC dan tanpa preheat. Pengujian mekanis yang dilakukan : tarik, kekerasan mikro, impak, dan analisa struktur mikro. Hasil pengujian menunjukkan bahwa preheat meningkatkan keuletan, ketangguhan dan kekuatan hasil pengelasan.

Beberapa penelitian mengenai pengurangan tegangan sisa dengan cara *post-weld* juga dilakukan. Penelitian telah dilakukan Telmo Viana Rodrigues (2010) mengenai perbandingan tegangan sisa sebelum dan setelah dilakukan PWHT pada plat X65 spesifikasi material API 5L dengan variasi temperatur PWHT. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa level suhu yang digunakan pada PWHT akan mempengaruhi nilai dari tegangan sisa. *Stress relieving* terjadi pada temperatur lebih dari 300<sup>0</sup> C dan nilai ini akan meningkat sampai temperatur 600<sup>0</sup>C dimana terjadi stabilisasi. Sedangkan dalam tugas akhir Aprilia (2016) menganalisa tentang pengaruh PWHT terhadap tegangan sisa dan distorsi terhadap sambungan tubular tipe T. Untuk sambungan tubular tipe K Dyah Setyo (2016) juga telah melakukan penelitian mengenai tegangan sisa dan distorsi sebelum dan sesudah perlakuan PWHT, namun untuk sambungan tipe K dalam penelitiannya hanya dimodelkan sebidang (planar) saja. Dalam tugas akhir kali ini akan menganalisa tegangan sisa dan distorsi sambungan tubular tipe K dengan geometri multiplanar.

## **2.2. DASAR TEORI**

### **2.2.1. PENGELASAN**

Berdasarkan Deutsche Industrie Normen (DIN) las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dari definisi tersebut dapat dijabarkan lebih lanjut bahwa las adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas. Pada saat ini teknologi pengelasan sudah cukup berkembang. Lebih dari 40 jenis pengelasan termasuk pengelasan yang dilaksanakan dengan hanya menekan 2

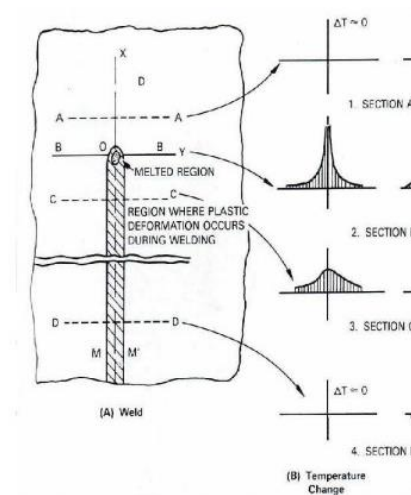
(dua) logam yang disambung sehingga terjadi ikatan antara atom-atom atau molekul-molekul dari logam yang disambungkan.

### 2.2.2. SIKLUS TERMAL PENGELASAN

Ketika suatu benda dikenai proses pengelasan, temperatur pada daerah busur las akan mengalami perubahan dengan sangat cepat. Hal ini mengakibatkan perbedaan temperatur di daerah sekitar busur las. Setelah perbedaan temperatur terjadi panas mulai mengalir ke sekitar daerah pengelasan yang mempunyai temperatur lebih rendah sehingga terjadi distribusi panas ke daerah sekitar alur las. Distribusi temperatur yang terjadi pada saat proses pemanasan maupun pendinginan tidak sama pada hampir tiap titik pada bagian daerah lasan. Seperti yang terlihat pada Gambar 3.1 terdapat bagian-bagian daerah berdasarkan distribusi temperaturnya.

- A-A : Daerah yang belum tersentuh panas
- B-B : Daerah yang mencair tepat pada busur las
- C-C : Daerah terjadinya deformasi plastis selama proses pengelasan
- D-D : Daerah yang sudah mengalami pendinginan.

Selain ditinjau dari tempatnya, distribusi yang tidak merata ini terjadi juga dari segi waktu. Hal ini mengakibatkan terjadinya siklus termal yang sangat kompleks, siklus ini menggambarkan laju pendinginan yang terjadi pada daerah tertentu dari benda las. Ketidakmerataan distribusi temperatur inilah yang menjadi penyebab timbulnya tegangan sisa dan distorsi pada struktur las.



**Gambar 2. 1** Siklus termal selama proses pengelasan (AWS vol I, 1996)

Adanya pemanasan dan pendinginan pada benda las, akan menyebabkan perubahan struktur mikro bagian-bagian tertentu pada benda las. Perubahan struktur mikro yang harus diperhatikan adalah pada daerah HAZ (*Heat Affected Zone*). Perubahan struktur mikro ini akan merubah sifat mekanik dari daerah yang mengalami perubahan tersebut. Sifat dari daerah HAZ akan mempengaruhi kualitas sambungan las, yang mana sifat ini tergantung pada lamanya proses pendinginan. Pemanasan yang terjadi pada saat pengelasan mendapat sumber panas dari elektroda yang digunakan. Nilai sumber panas dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$Q = \eta \cdot U \cdot I \quad (2.1)$$

Dimana:

$Q$  : *net heat input / effective thermal power* (watt)

$\eta$  : Koefisien efesiensi pengelasan

$U$  : Tegangan busur (Volt)

$I$  : Arus listrik (Ampere)

Nilai koefisien efisiensi pengelasan akan berbeda untuk setiap jenis pengelasannya. Energi panas yang terbentuk dari perubahan energi listrik tidak akan diserap secara penuh oleh logam lasan, sehingga energi busur las bersih dapat dihitung sebagai berikut:

$$H_{net} = \frac{f_1 \cdot E \cdot I}{v} \quad (2.2)$$

Dimana:

$H_{net}$  : Energi input bersih (J/mm)

$E$  : Tegangan (Volt)

$I$  : Arus listrik (Ampere)

$f_1$  : Efisiensi pemindahan panas

$v$  : Kecepatan pengelasan (mm/s)

Proses perpindahan atau distribusi panas yang terjadi saat pengelasan adalah proses konduksi dan konveksi. Proses konduksi terjadi pada logam yang menerima panas secara langsung karena adanya sentuhan langsung logam dengan elektroda. Sedangkan proses konveksi terjadi karena permukaan yang terkena langsung dengan udara. Proses konduksi lebih dominan daripada konveksi karena memiliki

nilai yang lebih tinggi dan panasnya ditransferkan ke semua arah. Persamaan dasar konduksi panas adalah:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q_G + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (2.3)$$

Dimana:

- $\rho$  : massa jenis (Kg/m<sup>3</sup>)
- $c$  : *specific heat* (J/Kg.k)
- $\lambda$  : konduktivitas termal (W/m.K)
- $Q_G$  : debit perubahan temperatur (W/m<sup>3</sup>)

Heat *flux* selama proses pemanasan dapat dihitung menggunakan hubungan vektor *heat flux* dan *thermal gradient*.

$$\{q\} = -[D] \cdot \{L\} \cdot T \quad (2.4)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Dimana:

- $[D]$  : Matriks konduktivitas (-)
- $K_{xx}$  : Konduktivitas arah x (W/mm.K)
- $K_{yy}$  : Konduktivitas arah y (W/mm.K)
- $K_{zz}$  : Konduktivitas arah z (W/mm.K)

Transfer panas pada distribusi temperatur dipengaruhi besarnya *heat flux* yang mengenai elemen, dapat dihitung dengan persamaan (Mahrlein, 1999):

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f} \quad (2.6)$$

Dimana:

- $q_1$  : *heat flux* pada elemen (J/mm<sup>2</sup>)
- $q_e$  : *heat flux* yang dihasilkan elektroda (J/mm<sup>2</sup>)
- $A_1$  : luas permukaan elemen (mm<sup>2</sup>)
- $A_f$  : luasan fluks yang dihasilkan elektroda (mm<sup>2</sup>)

$$q_e = \frac{H_{net}}{A_e} = \frac{f_1 \cdot E \cdot I}{A_e} = \frac{f_1 \cdot E \cdot I}{\pi r_e^2} \quad (2.7)$$

Jika persamaan 3.6 disederhanakan, maka didapat:

$$A_f = b \cdot v \cdot t \quad (2.8)$$

Dimana:

- b : Panjang kaki las (mm)
- v : Kecepatan pengelasan (mm/s)
- t : Waktu yang diperlukan pada satu elemen (s)

Sebagaimana pada konduksi, perbedaan suhu pada solid *base metal* dengan fluida pada *weld metal* menyebabkan terjadinya transfer energi dari daerah dengan suhu tinggi ke daerah dengan suhu rendah. Persamaan heat transfer secara konveksi diperoleh dari persamaan hukum pendinginan Newton,

$$q_h = h (T - T_{\infty}) \quad (2.9)$$

Dimana:

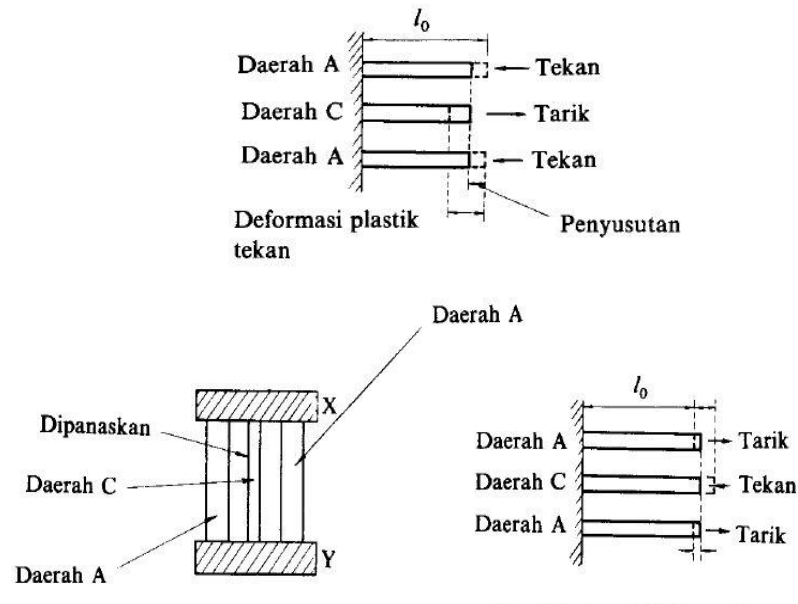
- $q_h$  : aliran panas secara konveksi ( $kW/m^2$ )
- h : koefisien konveksi ( $kW/m^2C$ )
- T : Temperatur pada permukaan solid ( $^{\circ}C$ )
- $T_{\infty}$  : Temperatur fluida pengelasan ( $^{\circ}C$ )

### 2.2.3. TEGANGAN SISA

Dalam proses pengelasan, bagian yang dilas menerima panas pengelasan setempat dan selama proses berjalan suhunya berubah terus sehingga distribusi suhu tidak merata. Karena panas tersebut maka pada bagian yang dilas terjadi pengembangan termal, sedangkan bagian yang dingin tidak berubah sehingga terbentuk penghalangan pengembangan yang mengakibatkan terjadinya peregangan yang rumit. Kalau tidak dihindari peregangan ini akan menyebabkan terjadinya perubahan bentuk tetap yang disebabkan karena adanya perubahan besaran mekanik. Di samping terjadi perubahan bentuk yang dengan sendirinya terjadi regangan maka terjadi juga tegangan yang sifatnya tetap yang disebut tegangan sisa. Tegangan sisa yang terjadi karena pengelasan ini dapat dibagi dalam dua kelompok, yaitu tegangan sisa oleh adanya halangan dalam yang terjadi karena pemanasan dan pendinginan setempat pada bagian konstruksi yang bebas. Sedangkan yang kedua tegangan sisa oleh adanya halangan luar, yang terjadi karena perubahan bentuk dan penyusutan dari konstruksi.

Sifat dan kekuatan sambungan sangat dipengaruhi oleh adanya tegangan sisa dan perubahan yang terjadi. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi tegangan sisa

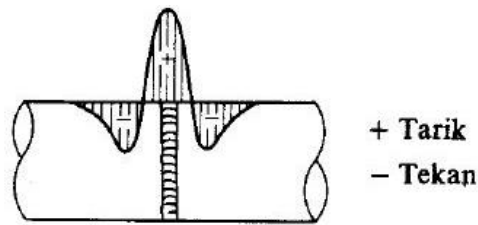
seperti proses penyusutan, proses pendinginan yang cepat, dan transformasi phase. Volum yang dipanaskan akan mengalami penyusutan selama proses pendinginan berdasarkan koefisien ekspansi termal material dan perbedaan temperatur yang ada. Volum yang mengalami peleburan tidak memberikan gaya kepada volume sekitar, sehingga sambungan las dan volum logam yang tidak meleleh selama proses pengelasan memiliki suhu berbeda dan tegangan sisa terjadi.



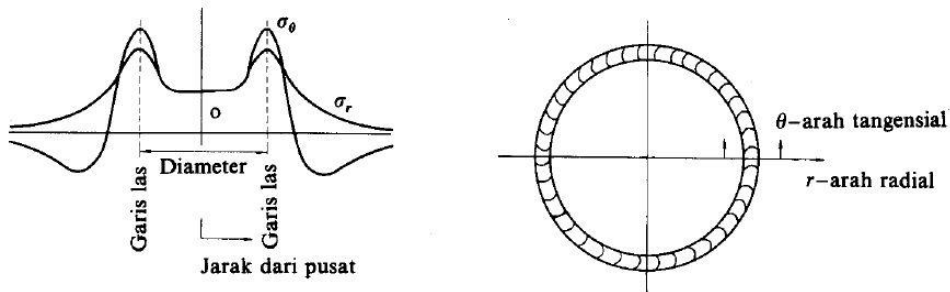
**Gambar 2. 2** Pembentukan tegangan sisa (Wiryosumarto, 2010)

Pada Gambar 2.2 daerah C mengembang waktu pengelasan dan ditahan oleh daerah A. Sehingga daerah C mengalami tegangan tekan dan pada daerah A terjadi tegangan tarik. Jika daerah A lebih luas daripada daerah C, maka daerah C tidak akan mengalami perubahan bentuk dan daerah A mengalami perubahan bentuk elastik. Ketika pengelasan selesai terjadi proses pendinginan, daerah C menyusut cukup besar karena ada pendinginan dan tegangan tekan. Penyusutan ini ditahan oleh daerah A, sehingga daerah C akan terjadi tegangan tarik yang diimbangi oleh tegangan tekan pada daerah A.

Distribusi tegangan sisa tergantung dari jenis dan bentuk las an. Dalam sambungan las bentuk lingkaran akan mengalami distribusi yang sama pada ujung jarak dari pusat. Gambar 2.3 dan Gambar 2.4 menunjukkan distribusi tegangan sisa pada las melingkar pipa. Distribusi tegangan sisa dalam sambungan melingkar pada pipa hampir sama seperti pada lasan plat datar.

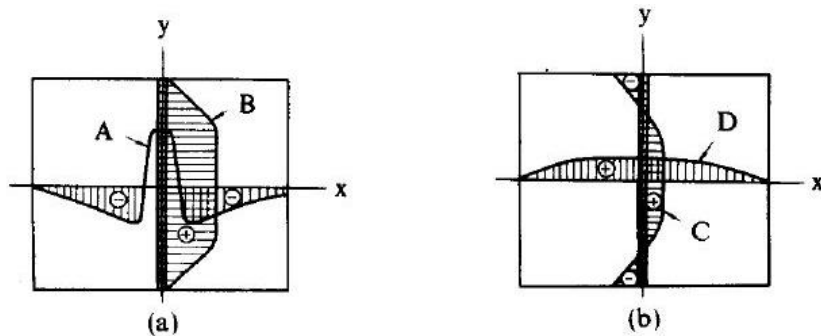


**Gambar 2. 3** Distribusi tegangan sisa pada las melingkar pada pipa (Wiryosumarto, 2010)



**Gambar 2. 4** Distribusi tegangan sisa pada las berbentuk lingkaran (Wiryosumarto, 2010)

Untuk las tumpul pada garis las an dengan arah memanjang akan mencapai batas kekuatan lulus pada garis las dan kemudian menurun mencapai nol pada ujung pelat. Sedangkan pada arah melintang garis las terjadi keseimbangan antara tegangan tarik dan tekan seperti yang terlihat pada Gambar 2.5.



Distribusi tegangan arah garis las ( $\sigma_y$ ).

A : distribusi pada sumbu x  
B : distribusi pada sumbu y

Distribusi tegangan arah melintang garis las ( $\sigma_x$ ).

C : distribusi pada sumbu x  
D : distribusi pada sumbu y

**Gambar 2. 5** Skema distribusi tegangan sisa dalam sambungan las tumpul (Wiryosumarto, 2010)

Tegangan sisa dihitung melalui persamaan hubungan antara tegangan-regangan. Menggunakan hukum Hooke tegangan sisa dapat dihitung melalui

besarnya regangan sisa yang terjadi. Dari hukum Hooke terlihat bahwa perubahan ukuran benda disebabkan oleh adanya tegangan, karena itu besarnya tegangan dapat dihitung. Dalam hal tegangan satu arah dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} \quad (2.10)$$

Dimana :

- $\sigma$  : tegangan sisa yang terjadi
- $E$  : Modulus elastik
- $l$  : panjang awal
- $\Delta l$  : perubahan panjang awal dan akhir

Dalam hal terjadi tegangan sisa dengan dua dimensi dapat dilakukan perhitungan dengan persamaan:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (2.11)$$

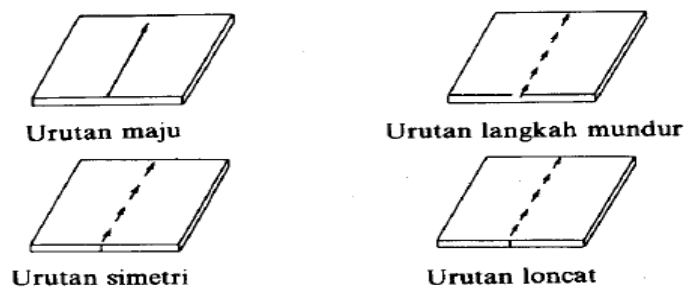
$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (2.12)$$

Dimana:

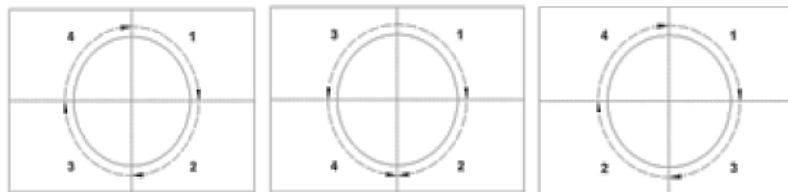
- $\sigma_x$  : tegangan tegak lurus garis las
- $\sigma_y$  : tegangan searah garis las
- $\varepsilon_x$  : regangan tegak lurus garis las
- $\varepsilon_y$  : regangan searah garis las
- $\nu$  : angka pebandingan Poisson

Besarnya tegangan sisa dapat dikurangi dengan cara mengurangi masukan panas dan banyaknya logam lasan. Penghalang luar juga menyebabkan terjadinya tegangan sisa, maka perlu menentukan urutan pengelasan (*welding sequence*) yang tepat. Urutan pengelasan pada plat dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.6. Sedangkan untuk urutan pengelasan melingkar dapat dilihat pada Gambar 2.7.





**Gambar 2. 6** Urutan pengelasan pada plat (Wiryosumarto, 2010)



**Gambar 2. 7** Urutan pengelasan melingkar menerus, simetri, dan loncat

Tegangan sisa juga dapat dibebaskan dengan cara mekanik dan *thermal*. Cara *thermal* banyak digunakan, dengan proses aniling. Proses aniling adalah proses pemanasan kembali setelah proses pengelasan dengan temperatur dan waktu tahan tertentu. Pada proses aniling ini, temperatur dan waktu tahan yang digunakan ditentukan berdasarkan jenis material benda las.

#### 2.2.4.DEFORMASI PADA PENGELASAN

Proses pengelasan yang terdiri dari pencairan, pembekuan, ekspansi, dan penyusutan akan menyebabkan perubahan bentuk atau deformasi pada benda las. Pada proses pengelasan, tegangan sisa dan distorsi merupakan hal yang berhubungan. Saat siklus pemanasan dan pendinginan berlangsung, regangan panas muncul di antara logam las dan logam induk pada daerah yang dekat dengan *weld bead*. Regangan ini menyebabkan tegangan dalam material dan dapat menyebabkan terjadinya *bending*, *buckling*, dan rotasi. Deformasi ini lah yang disebut distorsi. Macam-macam distorsi yang terjadi pada pengelasan, dengan ilustrasi pada Gambar 2.8 :

##### 1. *Transversal shrinkage*

Merupakan jenis distorsi yang berupa penyusutan tegak lurus terhadap garis las.

##### 2. *Longitudinal shrinkage*

Merupakan jenis distorsi yang berupa penyusutan material searah atau sejajar dengan garis las.

3. *Angular shrinkage*

Merupakan jenis distorsi yang terjadi karena adanya distribusi panas yang tidak merata pada kedalaman material sehingga menyebabkan terjadinya perubahan sudut.

4. *Rotational distortion*

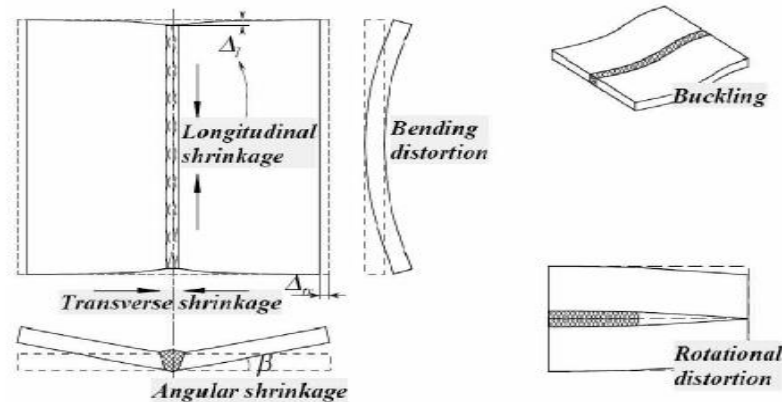
Merupakan distorsi sudut dalam bidang plat yang berkaitan dengan perluasan bidang panas.

5. *Buckling distortion*

Berhubungan dengan kompresi yang berkenaan dengan panas dan menyebabkan ketidakstabilan ketika platnya tipis.

6. *Longitudinal bending distortion*

Merupakan distorsi dalam bidang bidang yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap plat.



**Gambar 2. 8** Macam-macam distorsi pada pengelasan

Perubahan bentuk pada benda hasil pengelasan akan mengurangi ketelitian ukuran dan menurunkan kekuatan. Jika pada benda hasil pengelasan banyak terjadi deformasi harus dilakukan pelurusan yang akan memakan waktu dan tenaga. Sehingga perubahan bentuk harus dihindari dengan cara menentukan prosedur terlebih dahulu dan melakukan pengelasan sesuai dengan prosedur yang telah ditentukan. Sebelum proses pengelasan dimulai, benda yang akan dilas dapat diluruskan terlebih dahulu sesuai dengan bentuk dan ukuran yang seharusnya. Masukan panas yang kecil tidak akan menyebabkan terjadinya suhu tinggi sehingga

deformasi dapat dikurangi. Selain itu mengurangi logam las juga dapat dilakukan, sehingga ketika proses pendinginan jumlah logam yang menyusut tidak akan terlalu banyak dan deformasi akan berkurang.

### **2.2.5. POST WELD HEAT TREATMENT**

*Post Welding Heat Treatment* merupakan proses perlakuan panas pada benda hasil pengelasan dengan tujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang terbentuk setelah proses pengelasan selesai. Setelah pemanasan dan pendinginan akibat proses pengelasan, sifat material akan berubah karena adanya perubahan struktur mikro. Untuk mengembalikan kembali sifat material struktur maka dilakukan pemanasan pada suhu tertentu dan pada jangka waktu tertentu. Parameter suhu dan waktu ini tergantung dari jenis material dan ketebalan material.

Berdasarkan AWS D.1.1 Structural Welding Code-Steel pada bab Prequalification section 3.14 Postweld Heat Treatment, material yang dapat diberi perlakuan PWHT harus mempunyai syarat sebagai berikut:

1. Logam dasar yang akan diberi PWHT memiliki nilai *specified minimum yield strength* yang tidak melebihi 50 ksi (345 Mpa)
2. Logam dasar yang digunakan bukan hasil *quenching & tempering, quenching & self-tempering, thermomechanical control processing* (contohnya seperti ASTM A 500 tubing)
3. Material tidak disyaratkan untuk mengalami *impact test* pada *base metal, weld metal*, dan HAZ.
4. Adanya data pendukung bahwa material memiliki kekuatan dan keuletan yang cukup.
5. *Post Weld Heat Treat* dilakukan sesuai section 5.8

*Post Weld Heat Treatment* dilakukan sesuai berdasarkan **AWS D.1.1 Section 5.8** tentang *Stress-Relief Heat Treatment*, harus memenuhi kriteria-kriteria berikut ini:

1. Temperatur tungku pembakaran untuk PWHT tidak boleh melebihi 600<sup>0</sup>F (315<sup>0</sup>C) pada saat benda hasil pengelasan diletakkan.
2. Diatas 600<sup>0</sup>F, *heating rate* tidak boleh melebihi 400<sup>0</sup>F per jam dibagi dengan tebal maksimum logam pada bagian tertebal, dalam inch. Diatas 315<sup>0</sup>C, *heating rate* dalam <sup>0</sup>C/jam tidak boleh melebihi 560 dibagi dengan

tebal maksimum logam, tetapi tidak lebih dari 220<sup>0</sup>C/jam. Selama waktu pemanasan, variasi temperatur bagian yang dipanaskan tidak boleh melebihi 250<sup>0</sup>F(140<sup>0</sup>C) dengan interval panjang 5 m. *Heating rate* dan *cooling rate* tidak boleh kurang dari 100<sup>0</sup>F (55<sup>0</sup>C).

3. Setelah temperatur maksimum mencapai 1100<sup>0</sup>F (600<sup>0</sup>C) pada logam hasil *quenching* dan *tempering*, atau rentang temperatur rata-rata diantara 1100<sup>0</sup>F (600<sup>0</sup>C) dan 1200<sup>0</sup>F (650<sup>0</sup>C) pada logam lain, temperatur harus ditahan dengan batas waktu tertentu tergantung pada ketebalan lasan, tertera pada Tabel 2.2. Ketika *stress relief* digunakan untuk stabilitas dimensi, waktu tahan harus tidak kurang dari ketentuan di Tabel 2.2 tergantung ketebalan pada bagian tertebal. Selama *holding time*, perbedaan temperatur tertinggi dengan terendah pada bagian yang dipanaskan tidak lebih besar dari 150<sup>0</sup>F (85<sup>0</sup>C).
4. Diatas 600<sup>0</sup>F (315<sup>0</sup>C), pendinginan dilakukan pada bilik pendinginan dengan suhu tidak lebih dari 500<sup>0</sup>F (260<sup>0</sup>C) per jam dibagi dengan tebal maksimum logam pada bagian tertebal. Dari 600<sup>0</sup>F (315<sup>0</sup>C), benda las didinginkan ke temperatur ruang.

**Tabel 2. 1** *Minimum Holding Time*

<i>Weld thickness</i>	<i>Holding time</i>
¼ in atau kurang	15 menit
¼ in – 2 in	1 jam/ in (5 menit/2 mm)
Lebih dari 2 in	2 jam plus 15 menit untuk tiap pertambahan inch (25 mm) .

Ketika PWHT tidak dapat dilakukan dengan batasan temperatur sesuai dengan kriteria di atas, maka dapat dilakukan PWHT alternatif. Dalam PWHT alternatif, pembebasan tegangan dilakukan pada temperatur yang lebih rendah tetapi dengan waktu tahan yang lebih lama. Temperatur dan waktu tahan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2. 2** *Alternate Stress-Relief Heat Treatment*

Penurunan Temperatur di Bawah Ketentuan Temperatur Minimum		Waktu Tahan Minimum Saat Penurunan Temperatur, Jam/Inch ketebalan
$\Delta^{\circ}\text{F}$	$\Delta^{\circ}\text{C}$	
50	30	2
100	60	4
150	90	10
200	120	20

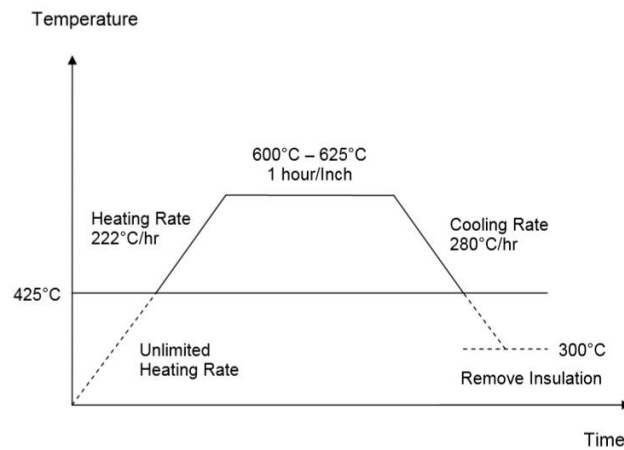
Proses PWHT ini dilakukan dengan pemanasan lokal di dekat daerah pengelasan. Parameter-parameter yang harus diperhatikan dalam PWHT adalah:

1. *Heating Rate*: proses pemanasan sampai temperature diatas atau dibawah temperature kritis suatu material.
2. *Holding Temperature*: proses penahanan material pada temperatur pemanasan untuk memberikan kesempatan adanya perubahan struktur mikro.
3. *Cooling Rate*: proses pendinginan material dengan kecepatan tertentu tergantung pada sifat akhir material yang dibutuhkan.

Dalam melakukan PWHT ada beberapa faktor penting yang harus diperhatikan agar tujuan dari PWHT ini dapat tercapai. Berikut ini adalah faktor penting tersebut:

1. *Expansion Area* : Proses pemanasan akan mengakibatkan terjadinya pemuaian dan ekspansi material. Sehingga harus diperhatikan bahwa saat *stress relieve* material tersebut tidak mengalami *restraint*
2. Insulasi : Area disekitar daerah yang akan di PWHT harus ditutup / dilapisi dengan *ceramic fiber* untuk menjaga kestabilan suhu
3. *Cleaning Material* : Permukaan material harus bersih
4. *Support Material* : Proses pemanasan akan mengakibatkan pelunakan material sehingga diperlukan *support* agar tidak terjadi distorsi.

Berikut adalah diagram dari Heating Treatment (Perlakuan panas) yang ditampilkan dalam gambar 2.9

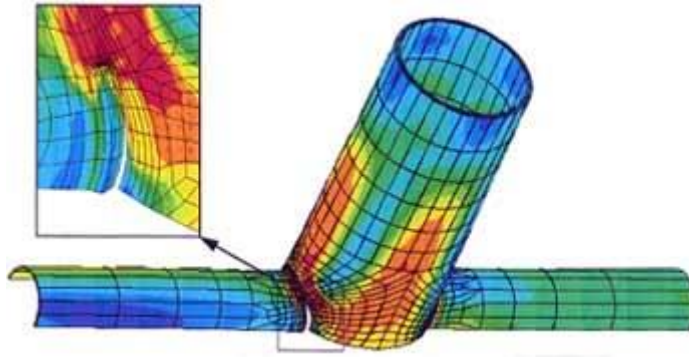


**Gambar 2. 9** *Heating Treatment Diagram* (Total E&P Indoensie 2011)

## 2.2.6. METODE ELEMEN HINGGA

Konsep dasar metode elemen hingga adalah pendekatan menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (*node*). Dalam proses penentuan titik simpul yang di sebut dengan pendiskritan (*discretization*), suatu sistem di bagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara menyeluruh. Usaha pendiskritan ini dilakukan agar memudahkan dalam analisa karena adanya keterbatasan dalam analisa secara global. Pada Gambar 3.10 diilustrasikan pendiskritan sebuah sambungan tubular joint.

Metode elemen hingga ini dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah. Struktur yang dianalisa dapat berbentuk sembarang, beban dan kondisi batas sembarang sesuai analisa yang dilakukan. Untuk memudahkan penerapan konsep metode elemen hingga dapat dilakukan pemodelan dengan software seperti ABAQUS, ANSYS, SAAP, dan CATIA.



**Gambar 2. 10** Contoh pendiskritan tubular joint  
(<http://alitputraiputu.blogspot.co.id/>)

Metode elemen hingga ini banyak digunakan karena hasil analisa sangat dekat atau hampir sama dengan struktur sebenarnya. Namun hasil dari metode elemen hingga ini bersifat numerik, bukan merupakan persamaan yang dapat diaplikasikan untuk berbagai kasus. Selain itu data-data yang dimasukkan cenderung banyak sehingga data output yang dijalankan oleh software pun lebih banyak.

Dalam tugas akhir ini, sambungan tubular multiplanar tipe K akan dimodelkan menggunakan ANSYS Mechanical APDL 16.0. Dalam software ANSYS dapat dilakukan pemodelan 2D ataupun 3D dengan elemen titik, elemen garis, elemen area, dan elemen solid. Semua jenis elemen ini dapat digabungkan untuk membentuk struktur yang akan dianalisa.

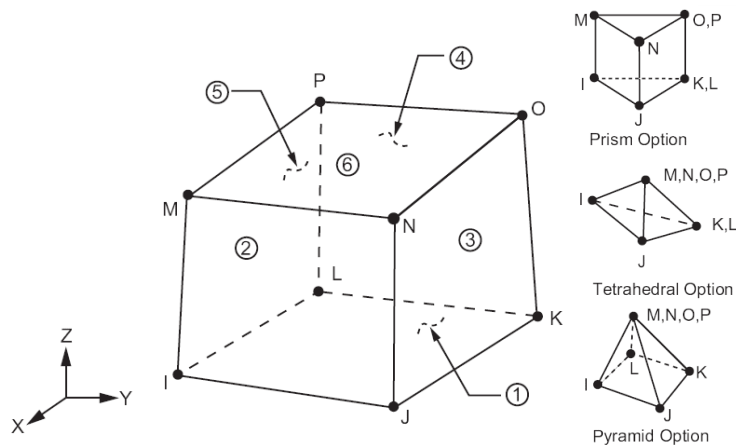
Dalam perumusan metode elemen hingga, terdapat tujuh tahap yang secara umum sering digunakan, yaitu :

### **1. Pendiskritan dan Pemilihan Jenis Elemen**

Pemilihan jenis elemen merupakan tahap yang sangat penting karena dapat menentukan keakuratan hasil analisa. Jenis elemen harus dipilih sesuai analisa agar dapat menghasilkan hasil analisa yang mendekati keadaan sebenarnya. Hasil analisa yang mendekati keadaan sebenarnya juga tergantung dari pendiskritan yang mana dalam pemodelan disebut dengan proses *meshing*. Ukuran yang dipilih ketika proses *meshing* harus mewakili keadaan struktur sebenarnya. Semakin kecil ukuran *meshing* akan membutuhkan kapasitas hardisk dan memori yang cukup besar. Hal ini karena input data *software* semakin banyak sehingga untuk proses akan lebih berat. *Meshing* untuk ukuran elemen kecil biasanya digunakan untuk analisa dengan

kondisi yang mengalami perubahan drastis. Sedangkan untuk *meshing* ukuran elemen besar digunakan untuk analisa yang perubahannya cenderung konstan.

Jenis elemen yang digunakan pada analisa termal adalah SOLID70. Elemen SOLID 70 memiliki delapan node dengan masing-masing node memiliki satu derajat kebebasan dan temperatur. Bentuk geometri SOLID70 dapat dilihat pada Gambar 2.11. Elemen ini memiliki kemampuan menghantarkan panas sehingga dapat digunakan untuk analisa termal *transient* dan *steady-state*. Elemen SOLID70 dapat membentuk elemen dengan bentuk elemen prisma, tetrahedral, dan juga piramida. Elemen ini didefinisikan dengan delapan node dan ortotropik material propertis. Untuk analisa *steady-state* spesifik heat dan massa jenis dapat diabaikan. Elemen yang memiliki kemampuan menghantarkan panas ini otomatis dapat juga digunakan untuk analisa struktural. Ketika proses analisa termal menggunakan SOLID70 sudah selesai dilakukan, otomatis pada proses analisa struktural jenis elemen akan berubah menjadi SOLID45.

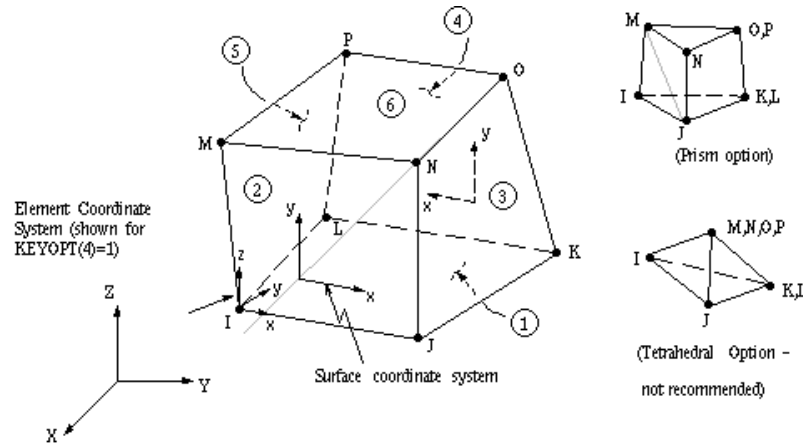


**Gambar 2. 11** Geometri Elemen SOLID70

Jenis elemen yang digunakan pada analisa struktural adalah SOLID45. Elemen SOLID 45 memiliki delapan node dengan masing-masing node memiliki tiga derajat kebebasan. Elemen ini dapat bertranslasi ke arah sumbu x dan y. Elemen ini memiliki kemampuan berdefleksi dan meregang secara besar karena memiliki sifat plastis. Elemen SOLID70 dapat membentuk



elemen dengan bentuk elemen prisma dan tetrahedral yang diilustrasikan pada Gambar 2.12. Elemen ini didefinisikan dengan delapan node dan ortotropik material propertis. Pada permukaan elemen dapat diberikan beban tekan.



**Gambar 2. 12** Bentuk elemen yang dapat dibentuk SOLID 45

## 2. Pemilihan fungsi displasmen

Menentukan fungsi displasmen yang didefinisikan pada tiap elemen dengan menggunakan nilai parameter di tiap node elemen. Fungsi yang digunakan adalah fungsi polinomial, linear kuadratik, kubik, atau deret trigonometri.

$$\{w\} = [N]\{u\} \quad (2.13)$$

## 3. Definisi hubungan regangan-displasmen dan tegangan-regangan

Dapat ditentukan hubungan regangan akibat displasmen yang sudah ditentukan pada tahap sebelumnya. Hubungan tegangan-regangan nanti akan digunakan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen.

$$\sigma = D \varepsilon^{el} \quad (2.14)$$

dan

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th} \quad (2.15)$$

dimana:

$\varepsilon$  : regangan total

$\varepsilon^{el}$  : regangan elastis

$\varepsilon^{th}$  : regangan termal

$D$  : kekakuan material

*Vector thermal strain* untuk isotropik medium dengan suhu yang tergantung pada koefisien ekspansi termal, dengan rumus:

$$\varepsilon^{th} = \Delta T \alpha(T) \quad (2.16)$$

$\Delta T$  adalah perbedaan antara *reference temperature* dengan *actual temperature*.

#### 4. Penentuan matriks kekakuan elemen dan persamaan elemen

Untuk menentukan matriks kekakuan dan persamaan elemen dapat digunakan metode keseimbangan langsung dan metode energi dengan menggunakan prinsip energi potensial minimum.

$$\delta U = \delta P \quad (2.17)$$

Dimana:

$U$  : *internal strain energy (internal work)*

$P$  : *external work*, seperti efek inersia

$\delta$  : *virtual operator*

*Virtual strain energy* dapat ditulis:

$$\delta U = \int [\delta \varepsilon]^T \{\sigma\} dV \quad (2.18)$$

Dimana:

$\varepsilon$  : vektor regangan

$\sigma$  : vektor tegangan

$V$  : volumen elemen

Substitusi persamaan (2.12) dan (2.13) untuk memperoleh  $\delta U$

$$\delta U = \int (\{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} - \{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon^{th}\}) dV \quad (2.19)$$

Strain yang dikaitkan dengan nodal displasmen:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u\} \quad (2.20)$$

Untuk displasmen konstan, energi regangan virtual adalah :

$$\delta U = \{\delta \varepsilon\}^T \int [B]^T [D] [B] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV \quad (2.21)$$

*External work* karena gaya inersia diformulasikan sebagai:

$$\delta P = - \int \{\delta w\}^T \{F^a\} dV \quad (2.22)$$

Dimana:

$w$  : vektor displasmen dari general point

$\{F^a\}$  : vektor *acceleration force*

Berdasarkan hukum gerak Newton II:

$$\{F^a\} = \rho \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{w\} \quad (2.23)$$

Jika displasmen dengan elemen dihubungkan pada nodal displasmen:

$$\{w\} = [N]\{u\} \quad (2.24)$$

Persamaan (3.20) dapat ditulis kembali menjadi:

$$\delta P = -\{\delta u\} \rho \int \{N\}^T [N] dV \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{u\} \quad (2.25)$$

Lalu substitusi persamaan (2.20) dengan persamaan (2.24) , menjadi:

$$\{\delta \varepsilon\}^T \int [B]^T [D] [B] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV = -\{\delta u\} \rho \int \{N\}^T [N] dV \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{u\} \quad (2.26)$$

$\{\delta u\}^T$  vektor adalah sebuah displasmen umum yang sebenarnya , sebuah kondisi diperlukan untuk memenuhi persamaan displasmen konstan dikurangi sampai:

$$[K_c] - \{F_c^{th}\} = [M_c]\{\ddot{u}\} \quad (2.27)$$

Dimana,

$$[K_c] = \int [B]^T [D] [B] dV \rightarrow \text{Matriks kekakuan elemen} \quad (2.28)$$

$$\{F_c^{th}\} = \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV \rightarrow \text{Vektor beban termal elemen} \quad (2.29)$$

$$\{M_c\} = \rho \int [N]^T [N] dV \quad (2.30)$$

##### 5. Penggabungan persamaan elemen dengan penentuan kondisi batas

Pada tahap ini akan didapatkan matriks kekakuan global yang bersifat singular. Kondisi batas digunakan untuk menghilangkan singularitasnya. Matriks kekakuan global didapatkan dari menggabungkan persamaan elemen pada tahap empat menggunakan metode kekakuan langsung.

##### 6. Penyelesaian derajat kebebasan yang belum diketahui

Mendapatkan hasil besaran yang diperlukan tetapi tidak didapat secara langsung dari tahap sebelumnya. Dapat dicari dengan metode eliminasi (misalkan metode *gauss*) dan iterasi (misalkan metode *gauss-siedel*).

##### 7. Penentuan regangan dan tegangan elemen

Perhitungan regangan dan tegangan yang terjadi pada elemen berdasarkan hasil dari tahap enam.

#### **8. Penampilan hasil**

Hasil yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk grafis sehingga akan mempermudah pembacaan hasil.

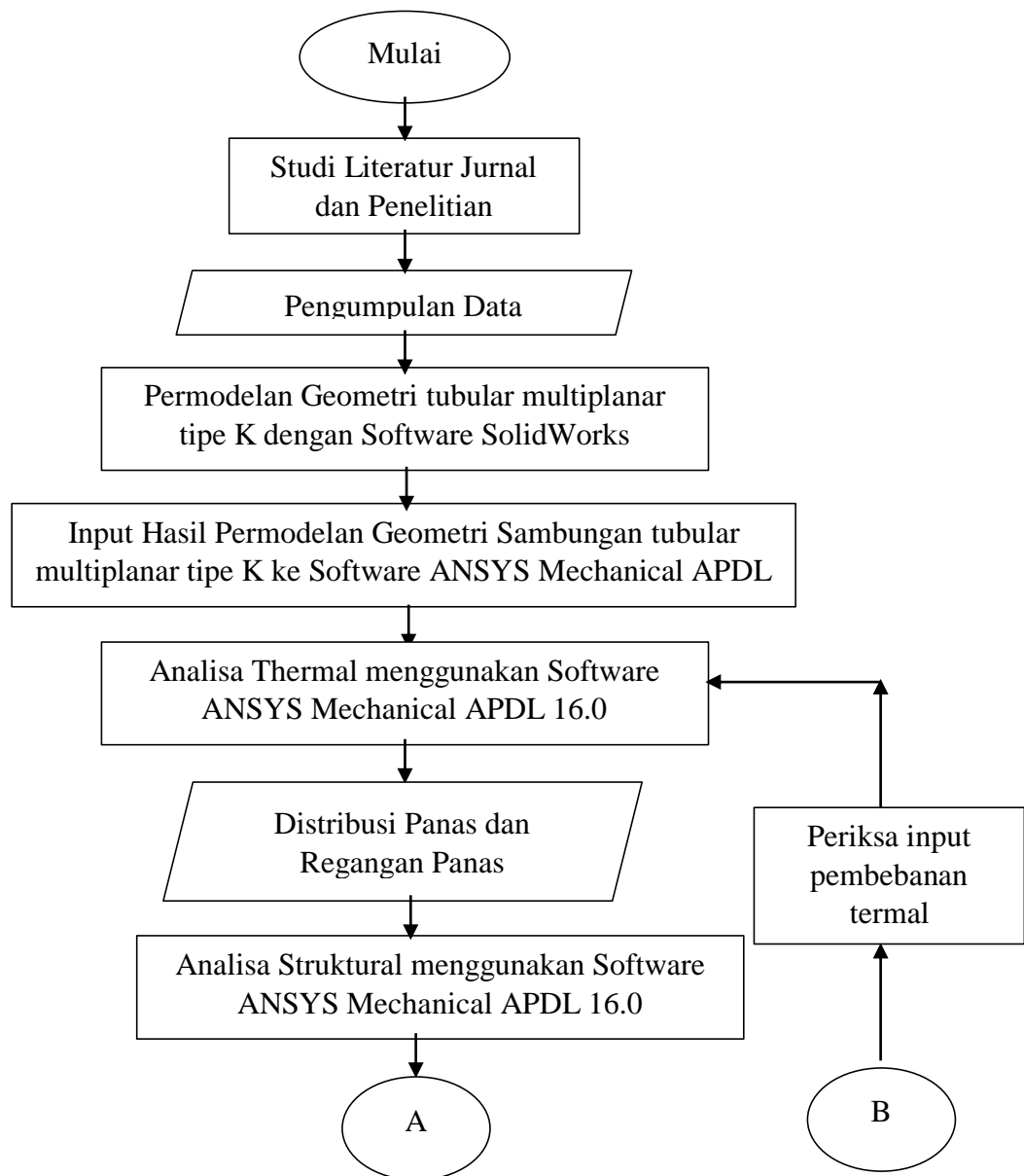
*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

### BAB III

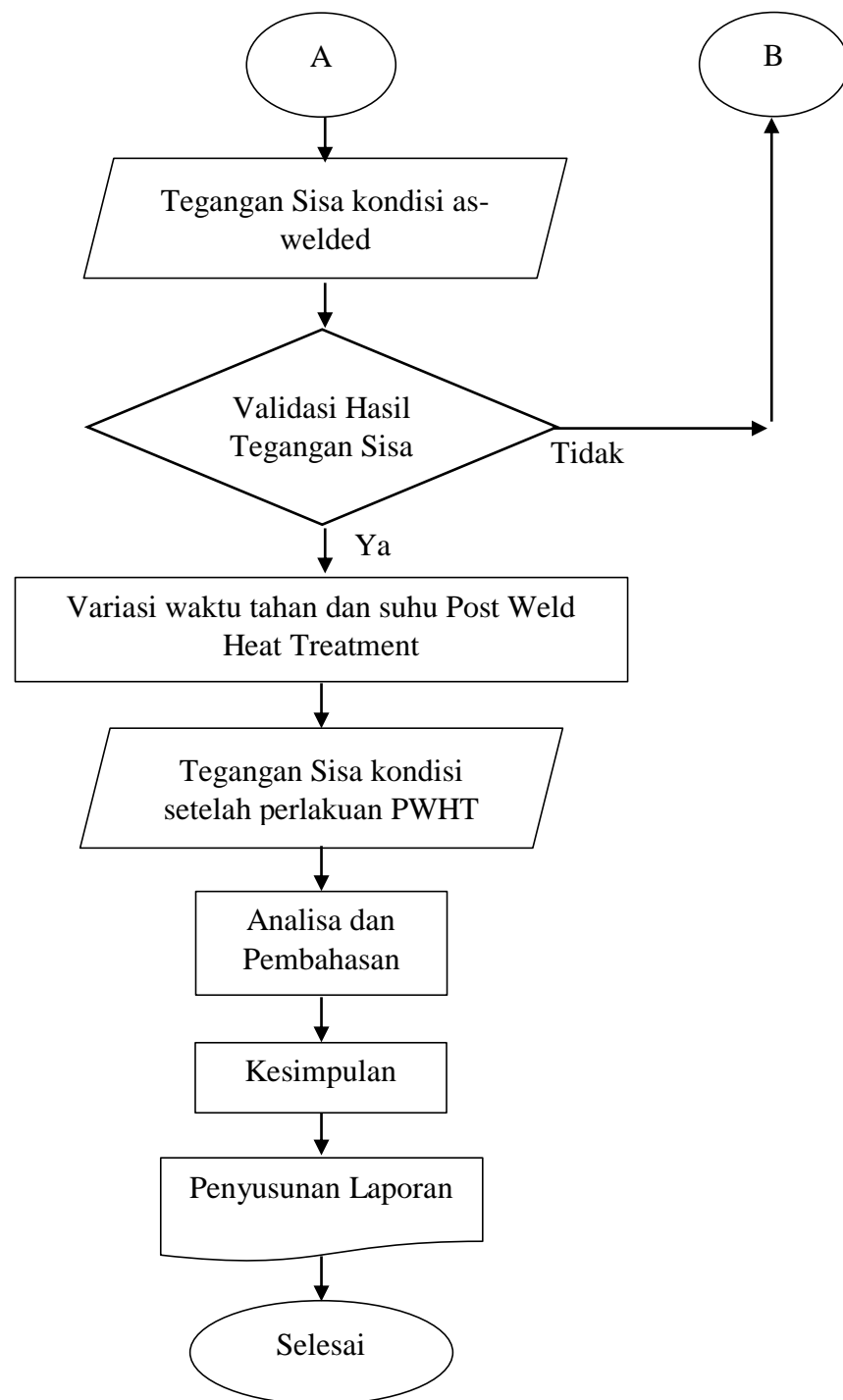
#### METODOLOGI PENELITIAN

##### 3.1. METODE PENELITIAN

Dalam mengerjakan tugas akhir perlu suatu langkah-langkah atau flowchart pengerjaan agar mempermudah evaluasi dan perkembangan penelitian. Secara garis besar pengerjaan tugas akhir ini dapat dijelaskan pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 berikut ini.



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir



**Gambar 3. 2** Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (lanjutan)

### **3.2. PENJELASAN DIAGRAM ALIR PENELITIAN**

#### **3.2.1. STUDI LITERATUR JURNAL**

Studi Literatur Jurnal dilakukan untuk mengetahui beberapa informasi tentang penelitian-penelitian sebelumnya. Pada proses ini sumber yang didapatkan merupakan jurnal, buku, serta tugas akhir yang berkaitan dengan topik tugas akhir yaitu tegangan sisa pada sambungan lasan.

#### **3.2.2. PENGUMPULAN DATA**

Mengumpulkan informasi-informasi yang berkaitan dengan tugas akhir. Data yang dibutuhkan merupakan suatu hal yang sangat penting guna untuk melakukan input saat proses analisa. Dalam hal ini Welding Procedur Spesification atau WPS menggunakan data yang berasal dari PT. Gunanusa Utama Fabricator.

#### **3.2.3. PERMODELAN GEOMETRI**

Membuat model geometri dari sambungan tubular multiplanar tipe K sesuai dengan data WPS menggunakan software Solidworks.

#### **3.2.4. INPUT HASIL PERMODELAN GEOMETRI SAMBUNGAN TUBULAR MULTIPLANAR TIPE K KE SOFTWARE ANSYS**

Memasukkan output permodelan geometri yang telah dilakukan menggunakan software solidworks ke dalam software ANSYS. Kemudian mengaati secara jeli sehingga model yang diinginkan sesuai dengan input yang ada di software ANSYS.

#### **3.2.5. ANALISA THERMAL STRUKTUR MENGGUNAKAN SOFTWARE ANSYS MECHANICAL APDL 16.0**

Setelah geometri dimasukkan, sebelum dilakukan analisa termal perlu dilakukan *meshing*. *Meshing* merupakan pembagian sambungan tubular menjadi elemen-elemen kecil dengan bentuk elemen tertentu. Elemen yang digunakan adalah SOLID70. Setelah itu dimasukkan data properti material sambungan tubular yang digunakan termasuk data termal material. Beban termal dilakukan secara transient sesuai dengan alur pengelasan yang dilakukan. Lalu dilakukan *running/solve* sehingga didapatkan hasil pemodelan *thermal*. Hasil yang didapat dari analisa ini berupa Distribusi Panas dan Regangan Panas.

#### **3.2.6. ANALISA STRUKTURAL MENGGUNAKAN SOFTWARE ANSYS MECHANICAL APDL 16.0**

Pada tahap ini hasil dari analisa *thermal* berupa regangan *thermal* diubah menjadi regangan struktural. Tipe analisis yang dilakukan diubah dari *thermal* menjadi analisa struktural. Lalu diberi beban yang mengenai struktur sesuai dengan data. Setelah itu dilakukan *running/solve* sehingga didapatkan hasil dari analisa



struktural. Analisa struktural menghasilkan regangan struktural yang mengakibatkan timbulnya tegangan struktural. Selain itu juga didapatkan hasil distorsi yang terjadi. Hasil dari analisa ini berupa tegangan sisa pada kondisi as-welded.

### **3.2.7. VALIDASI HASIL TEGANGAN SISA KONDISI AS-WELDED**

Selanjutnya adalah validasi hasil tegangan sisa kondisi as-welded, hasil yang didapatkan pada tahap sebelumnya berupa tegangan sisa akan dicek dan dibandingkan dengan tegangan sisa yang didapatkan dari hasil eksperimen. Dalam hal bukan ditentukan dari nilai tegangan sisa antara numeris dengan eksperimen tetapi dari tren grafik hasil tegangan sisa pada perhitungan numeris dan juga dari hasil eksperimen.

### **3.2.8. VARIASI WAKTU TAHAN DAN SUHU POST WELD HEAT TREATMENT**

Setelah dilakukan pemodelan untuk mendapatkan tegangan sisa pada sambungan tubular multiplanar tipe K. Tahap selanjutnya adalah memberi perlakuan PWHT. PWHT ini dilakukan dengan memberikan beban panas kembali selama waktu tahan tertentu. PWHT dilakukan dengan variasi suhu dan waktu tahan. Variasi 1 menggunakan suhu dan waktu tahan standar.

### **3.2.9. ANALISA DAN PEMBAHASAN**

Setelah didapatkan tegangan sisa hasil running permodelan dari software ANSYS maka akan didapatkan tegangan sisa pada saat kondisi as-welded dan setelah diberi perlakuan PWHT, maka akan dibandingkan seberapa besar pengaruh dari PWHT terhadap tegangan sisa.

### **3.2.10. KESIMPULAN**

Hasil analisa pada tugas akhir ini merupakan tegangan sisa yang terjadi pada sambungan tubular multiplanar tipe K hasil pengelasan. Sehingga dapat dihasilkan kesimpulan berdasarkan tujuan analisa.

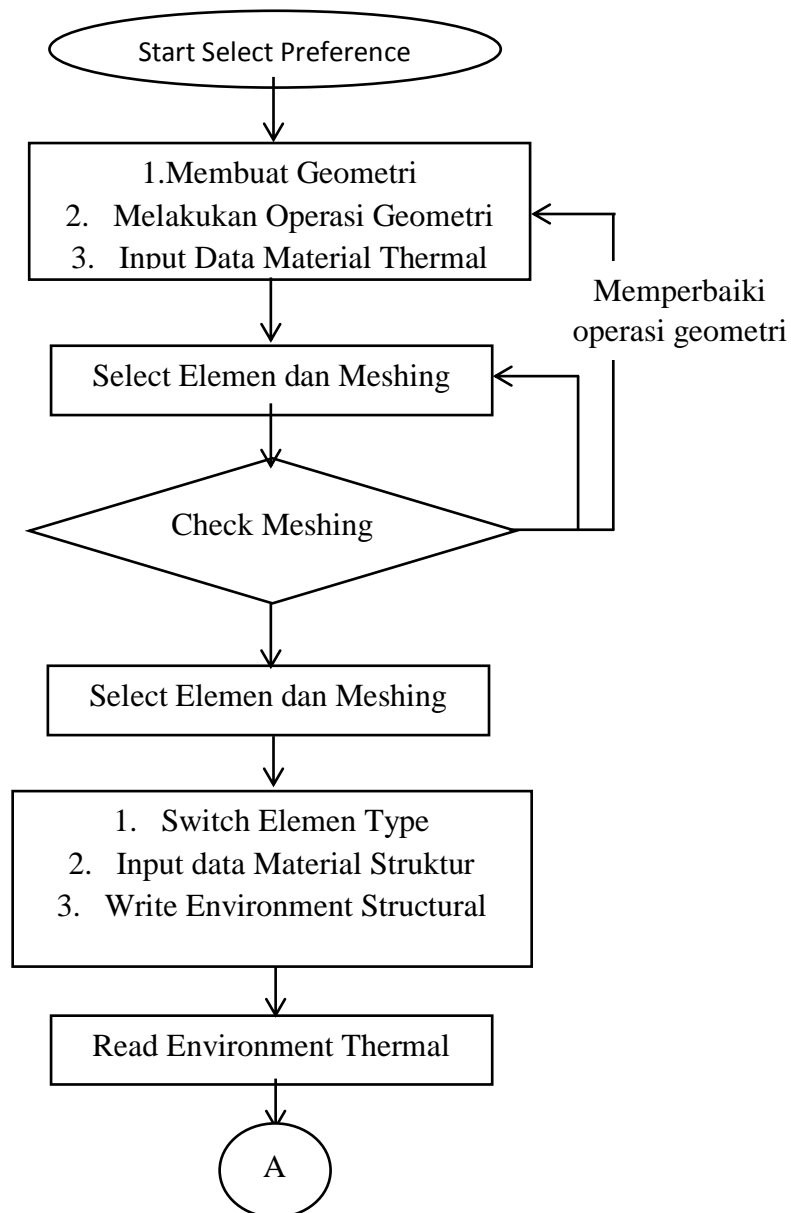
## **3.3. PERMODELAN TERMAL DAN PERMODELAN STRUKTUR**

Penjelasan masing-masing diagram alir permodelan termal dan struktur akan dijelaskan sebagai berikut.

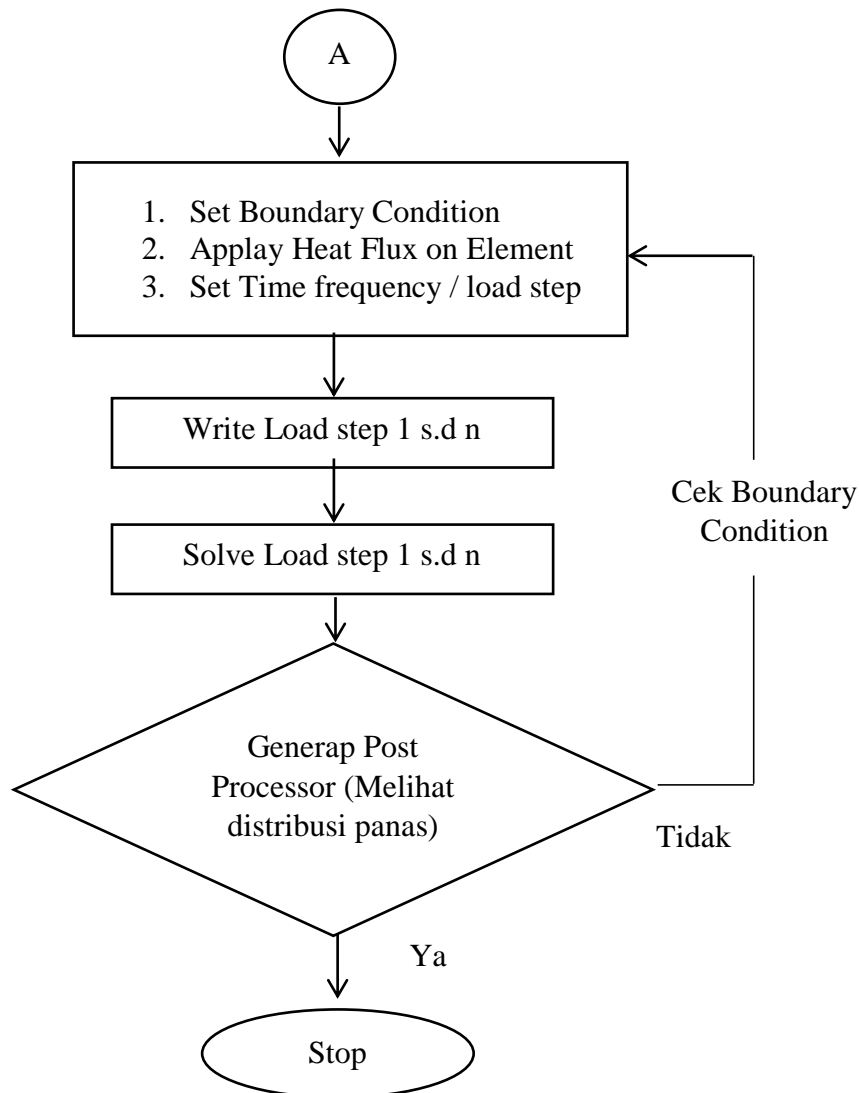
### **A. Permodelan Termal**

Setelah geometri dimasukkan, sebelum dilakukan analisa termal perlu dilakukan *meshing*. *Meshing* merupakan pembagian sambungan tubular menjadi elemen-elemen kecil dengan bentuk elemen tertentu. Elemen yang digunakan

adalah SOLID70. Setelah itu dimasukkan data properti material sambungan tubular yang digunakan termasuk data termal material. Beban termal dilakukan secara transient sesuai dengan alur pengelasan yang dilakukan. Lalu dilakukan *running/solve* sehingga didapatkan hasil pemodelan *thermal*.



**Gambar 3. 3** Diagram Alir Analisa Thermal



**Gambar 3. 4** Diagram Alir Analisa Thermal (lanjutan)

Penjelasan diagram alir analisa thermal adalah sebagai berikut:

1. *Start Preference Thermal*

Langkah pertama untuk memulai pemodelan dengan menggunakan ANSYS adalah dengan memilih bidang ilmu yang akan digunakan untuk menyelesaikan masalah pemodelan beban panas yang diberikan. Dalam tahap ini dipilih analisa dipilih terhadap *Thermal*.

## 2. Pembuatan Geometri

Pembuatan *design* geometri model dibuat dalam bentuk 3 Dimensi dengan menggunakan *software* SOLIDWORKS dengan dimensi pipa yang telah ditentukan. Setelah geometri selesai dibuat, karena *software* yang digunakan berbeda dengan *software* untuk melakukan proses analisa *thermal* dan *structural* model tersebut disimpan dalam format IGS sehingga ANSYS sebagai *software* analisa mampu membaca. Apabila ANSYS tidak mampu membaca berate ada kesalahan pada saat pembuatan geometri sehingga dilakukan kembali design geometri menggunakan SOLIDWORK.

## 3. Input Data *Thermal Properties*

Gemoteri model yang telah digambarkan di menggunakan *software* SOLIDWORK tersebut kemudian diinputkan kedalam *software* ANSYS dalam format IGS untuk dilakukan analisa *thermal*. Material yang telah di input tersebut kemudian dilakukan penentuan karakteristik material dengan cara *Input Thermal Properties*. Penentuan krakteristik dari material ini diperlukan untuk menentukan sifat material terhadap suatu pembebanan *thermal*.

## 4. Pemilihan Elemen dan *Meshing*

Pada tahap ini model yang telah dibuat diberikan jenis elemen. Tahap ini bertujuan untuk membagi keseluruhan bagian dari model menjadi beberapa elemen yang lebih kecil yang seragam dengan titik titik yang disebut sebagai nodal atau *nodes* sehingga perhitungan dapat dilakukan terhadap titik- titik nodal secara lebih teliti. Meshing tersebut dapat dilakukan secara manual sesuai dengan tingkat ketelitian yang diinginkan. Semakin banyak elemen meshing yang dibuat maka semakin teliti perhitungannya.

## 5. *Write Environment Thermal*

Environment merupakan fasilitas dalam ANSYS yang dignakan untuk menandai salah satu bidang permasalahan tersebut. Setelah model telah selesai dibuat dan ditentukan *properties* nya, maka model tersebut dapat disimpan

dengan penamaan “*Thermal*” sehingga model dapat digunakan secara berulang tanpa perlu melakukan pembuatan kembali model dan kondisi pembebanannya

6. *Switch Element Type, Input Data Structural Properties, Write Environmental* ”Structural”

Model yang telah disiapkan untuk analisa *thermal* tersebut kemudian juga dipersiapkan untuk analisa struktural. Hal itu dilakukan sehingga material dengan karakteristik thermal tersebut dapat ditambahkan dengan karakteristik strukturalnya. Analisa struktural dapat dimungkinkan terjadi pada tahap ini. Setelah tahap ini usai, proses ini diberi nama “Structural”

7. *Read Environment* “Thermal”

Pada Tahap ini, digunakan kembali model dan properties yang telah dilakukan pada tahap 5 untuk melakukan proses pembebanan secara termal. Tahap ini dilakukan dengan cara membuka kembali file model pada tahap 5 tersebut dengan cara melakukan perintah *Read Environmental* “Thermal”

8. Pemberian Beban *Thermal*

Model yang telah lengkap kemudian diberi beban thermal. Beban yang akan diberikan seperti *heat flux* dan konveksi. *Heat flux* merupakan beban yang mewakili beban pengelasan. Sedangkan konveksi merupakan kondisi batas yang diberikan karena material bersentuhan langsung dengan udara.

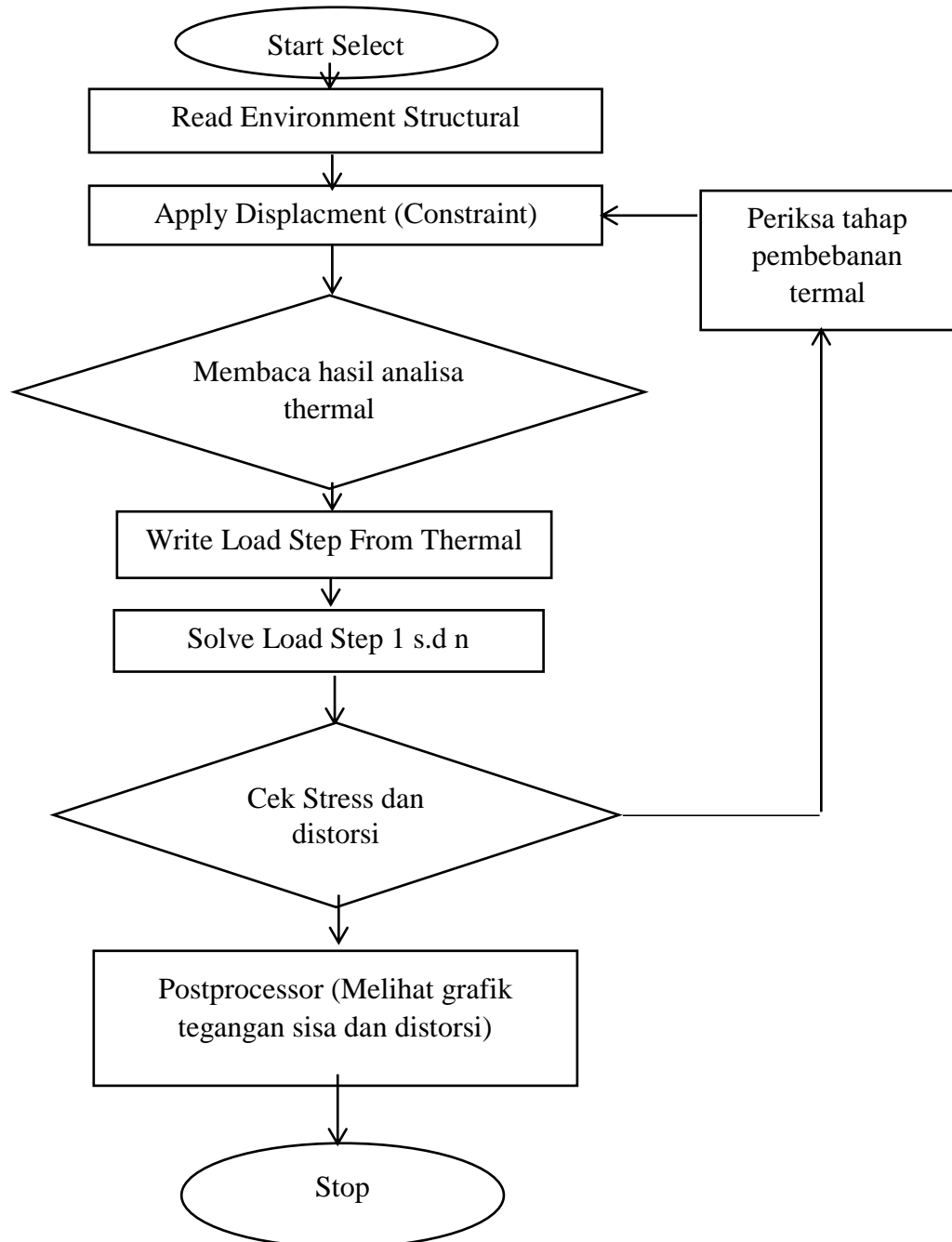
9. *Solve Load Step* 1-n

*Solve Load* ini dilakukan untuk melakukan *running* terhadap model yang telah dikondisikan sesuai dengan tahapan sebelumnya. Running ini dilakukan dengan cara bertahap sesuai dengan tahapan pembebanan. yang telah ditetapkan sehingga dalam penentuannya, *Solve load* ini dilakukan dimulai dari tahap 1 hingga tahap terakhir (n)

10. General Postprocessor

Setelah Proses Running, maka didapatkan hasil reaksi model terhadap pembebanan. Hasil dari proses ini berupa ilustrasi efek pembebanan *thermal* pada model akibat pengelasan.

## B. Permodelan Struktural



**Gambar 3. 5** Diagram Alir Analisa Struktural

Pada prinsipnya pemodelan struktur ini hampir sama dengan pemodelan termal, perbedaan mendasar terletak pada solusi. Penjelasan detail diagram alir struktur adalah sebagai berikut:

#### 11. *Read Environment Structural*

Pada Tahap ini, digunakan kembali model dan properties yang telah dilakukan pada tahap pemodelan termal poin 6 untuk melakukan proses pembebanan secara struktural. Tahap ini dilakukan dengan cara membuka kembali file model pada tahap tersebut dengan cara melakukan perintah *Read Environmental* “Structural”

#### 12. *Apply Displacement (Constraint)*

Pada tahap ini adalah memberikan kondisi batas yang berupa tumpuan. Tahap dilakukan sehingga pada saat proses komputasi, *software* tidak menghitung kebebasan distorsi ke seluruh arah namun terdapat fiksasi pada bagian bawah dari material yang di las. Selain itu juga, ditetapkan bahwa bentuk atau geometri dari kampuh las tidak bergerak selama proses pengelasan.

#### 13. Pembebanan Struktural dari Hasil Pembebanan *Thermal*

Pembebanan struktural dilakukan dengan mengambil hasil dari proses pembebanan termal. Karena beban termal dilakukan dengan menggunakan load step maka pembebanan juga dilakukan dengan metode load step dan dikalkulasikan terhadap kondisi struktural.

#### 14. Write Load Step

Pembebanan yang dilakukan diatas kemudian ditulis dalam load step. Penulisan ini berguna untuk pembacaan dalam proses solve. Pembebanan yang telah dilakukan kemudian dibuat berdasarkan load step dengan cara “Write load step”. Penulisan load step ini dilakukan sebanyak pembebanan yang dilakukan yaitu mulai dari load step 1 hingga load step ke-n

#### 15. *Solve Load Step 1 s.d n*

*Solve Load* ini dilakukan untuk melakukan *running* terhadap model yang telah dikondisikan sesuai dengan tahapan sebelumnya. Running ini dilakukan dengan

cara bertahap sesuai dengan tahapan pembebanan yang telah ditetapkan. Solve load ini dilakukan dimulai dari tahap 1 hingga tahap terakhir (n).

#### 16. *Post Processor*

Tahap ini merupakan tahap untuk mendapatkan hasil distorsi dan tegangan sisa pada tiap tiap load step tersebut. Hasil dari proses ini merupakan ilustrasi atau penggambaran efek pembebanan pada material yang terkena efek dari pengelasan.



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB IV**

### **ANALISA DAN PEMBAHASAN**

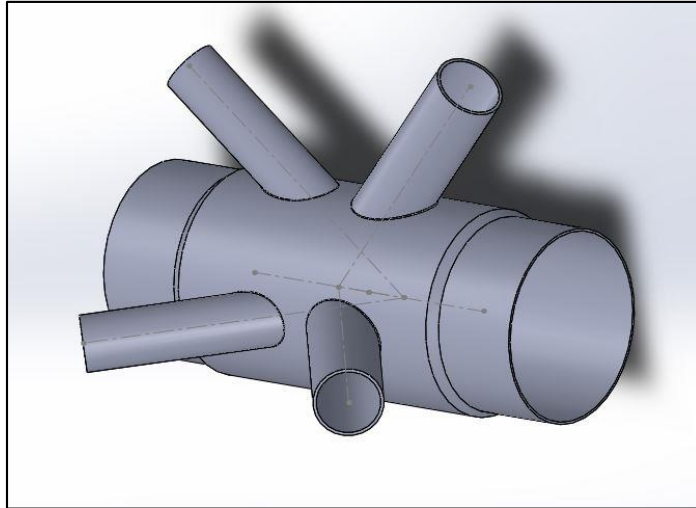
#### **4.1. PERMODELAN STRUKTUR**

Dalam tugas akhir ini dimodelkan sambungan tubular multiplanar tipe-K. Salah satu sambungan yang didapat dari sebuah wellhead platform dari PHE yang dikerjakan oleh PT Gunanusa Utama Fabricator. Data-data struktur yang dibutuhkan berupa data wellhead jacket platform PHE-24 yang memuat dimensi-dimensi dari sambungan tubular multiplanar tipe-K itu sendiri. Permodelan sambungan tubular dalam tugas akhir ini menggunakan software Solidwork 2014 sesuai dengan dimensi dan bentuk geometri yang ada dalam data. Setelah geometri selesai dibuat maka model sambungan tubular dikonversikan ke dalam ANSYS 16.2 untuk mengetahui apakah bentuk geometri sesuai dengan sambungan tubular yang sebenarnya. Berikut data geometri sambungan tubular multiplanar tipe-K dari PT. Gunanusa Utama Fabricator yang disajikan pada Tabel 4.1.

**Tabel 4. 1** Ukuran Geometri Sambungan Tubular Multiplanar tipe-K

Type Material			API 5L X52	
Parameter	Chord 1	Chord 2	Brace 1	Brace 2
Diameter	65 in	61 in	18 in	22 in
Ketebalan	5 in	1 in	0.75 in	1 in
Panjang	8 ft	168 ft	18.75 ft	28.1 ft

Hasil permodelan menggunakan software Solidwork 2014 akan ditampilkan pada Gambar 4.1 berikut



**Gambar 4. 1** Model Geometri Sambungan Tubular Multiplanar tipe K

#### 4.2. CHECK TUBULAR JOINT SESUAI DENGAN API RP 2A

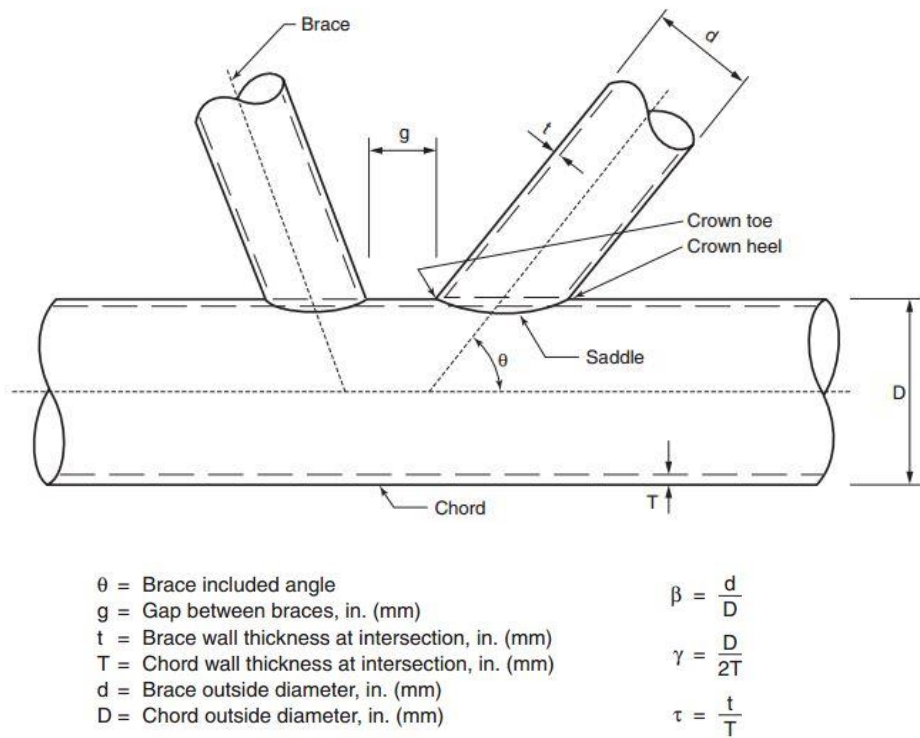


Figure 4.3-1—Terminology and Geometric Parameters, Simple Tubular Joints

**Gambar 4. 2** Referensi Standar Tubular Joint API RP2A

#### 4.3.1 Validity Range

The terminology for simple joints is defined in [Figure 4.3-1](#).

The validity range for application of the practice defined in 4.3 is as follows:

$$\begin{array}{rclcl} 0.2 & \leq & \beta & \leq & 1.0 \\ 10 & \leq & \gamma & \leq & 50 \\ 30^\circ & \leq & \theta & \leq & 90^\circ \\ F_y & \leq & 72 \text{ ksi (500 MPa)} & & \\ g/D & > & -0.6 \text{ (for K joints)} & & \end{array}$$

**Gambar 4.3** Validity Range Tubular Joint API RP2A

Data dan cek tubular joint

#### 1. Brace 1 & 2

$$\Theta = 48.223^\circ$$

$$g = 0.264 \text{ m} = 264 \text{ mm}$$

$$t = 0.75 \text{ inch} = 19.05 \text{ mm}$$

$$T = 3 \text{ inch} = 76.2 \text{ mm}$$

$$d = 18 \text{ inch} = 457.2 \text{ mm}$$

$$D = 65 \text{ inch} = 1651 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{a. } \beta &= d/D \\ &= 457.2 / 1651 \\ &= 0.2769 \\ 0.2 &\leq \mathbf{0.2769} \leq 1.0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } \gamma &= D/2T \\ &= 1651 / 2 \times 76.2 \\ &= 10.833 \\ 10 &\leq \mathbf{10.833} \leq 50 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c. } \Theta &= 48.223^\circ \\ 30^\circ &\leq \mathbf{48.223^\circ} \leq 90^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{d. } g/D &= 0.264 / 1651 \\ &= \mathbf{0.1599} \\ g/D &> -0.6 \end{aligned}$$

## 2. Brace 3 & 4

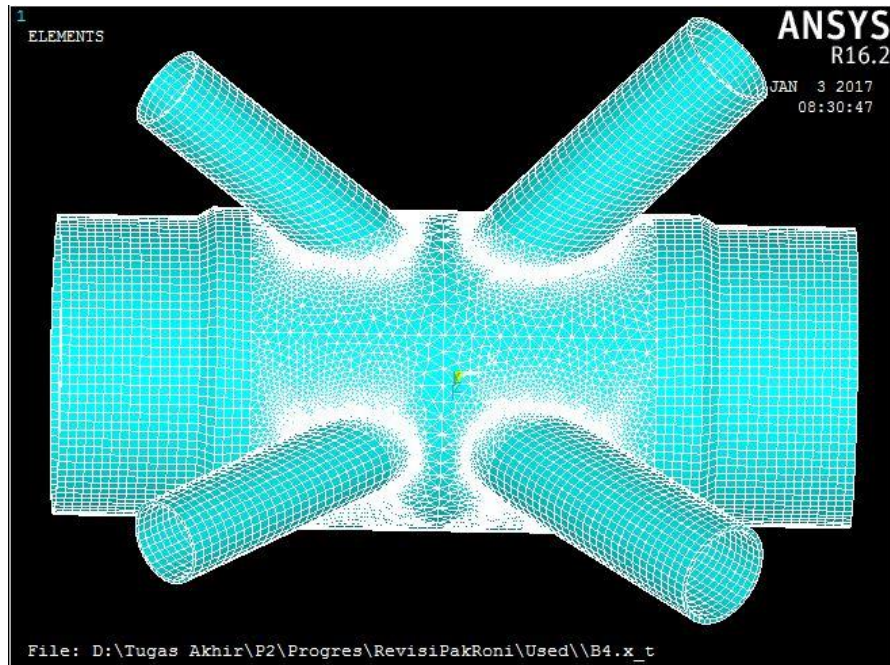
$$\begin{aligned}\Theta &= 49.340^\circ \\ g &= 0.264 \text{ m} = 264 \text{ mm} \\ t &= 1.0 \text{ inch} = 25.4 \text{ mm} \\ T &= 3 \text{ inch} = 76.2 \text{ mm} \\ d &= 22 \text{ inch} = 558.8 \text{ mm} \\ D &= 65 \text{ inch} = 1651 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{a. } \beta &= d/D \\ &= 558.8 / 1651 \\ &= 0.338 \\ &0.2 \leq \mathbf{0.338} \leq 1.0 \\ \text{b. } \gamma &= D/2T \\ &= 1651 / 2 \times 76.2 \\ &= 10.833 \\ &10 \leq \mathbf{10.833} \leq 50 \\ \text{c. } \Theta &= 49.340^\circ \\ &30^\circ \leq \mathbf{49.340^\circ} \leq 90^\circ \\ \text{d. } g/D &= 0.264 / 1651 \\ &= \mathbf{0.1599} \\ &g/D > -0.6\end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas ukuran dan jarak antar brace sudah sesuai dengan referensi standar yang digunakan, yaitu API RP 2A. Hal ini sangat penting karena

### 4.3. MESHING

Sebelum dilakukan pembebanan *heat flux* pada model perlu dilakukan *meshing*. *Meshing* adalah membagi model menjadi elemen-elemen kecil. Variasi panjang *meshing* akan menghasilkan jumlah node yang berbeda. Pemilihan bentuk dan ukuran *meshing* akan mempengaruhi hasil, waktu *solving*, jumlah elemen, dll. Dalam simulasi ini digunakan *meshing* bentuk hexahedral dan tetrahedral, seperti yang tampak pada Gambar 4.4.



**Gambar 4. 4** Hasil Meshing Sambungan dengan ANSYS 16.2

Bentuk dan ukuran meshing antara daerah yang dekat dengan lasan dan yang jauh dari lasan berbeda, misalnya pada daerah dekat dengan sambungan digunakan bentuk meshing tetrahedral karena dapat secara detail menganalisa daerah lasan sedangkan daerah yang jauh dengan sambungan lasan digunakan bentuk meshing hexahedral karena untuk memperingan kerja dari komputer. Ukuran meshing tetrahedra yaitu 0,01 m sedangkan hexahedral 0,05 m.

#### 4.4. PERHITUNGAN BEBAN HEAT FLUX

Simulasi pengelasan pada sambungan tubular multiplanar tipe-K beban akan diberikan pada tiap luasan elemen yang akan ditransfer menjadi beban tiap nodal. Beban yang diberikan merupakan heat flux dimana besarnya diperoleh dari heat input bersih yang mengenai tiap elemen. Parameter pengelasan yang digunakan untuk mensimulasikan sambungan lasan akan disajikan dalam tabel 4.3 berikut

**Tabel 4. 2** Parameter Pengelasan

Parameter	Keterangan
Process	FCAW
<i>Filler Metal</i>	E71T-9C

<b>Diameter Filler Metal (mm)</b>	1.2
<b>Arus listrik (Ampere)</b>	209
<b>Voltage</b>	26
<b>Kecepatan pengelasan (mm/min)</b>	148
<b>Heat Input (kj/mm)</b>	1.83 Max

### 1. Beban Heat Flux untuk Brace 1 dan 2

- Heat input

$$Q = \eta U I$$

Dimana:

Q : Net heat input (Watt)

$\eta$  : Koefisien efisiensi

U : Tegangan busur (Volt)

I : Arus listrik (Ampere)

Dengan

$$Q = 0.85$$

$$U = 26 \text{ volt}$$

$$I = 209 \text{ Ampere}$$

Maka,

$$Q = \eta U I$$

$$= 0.85 \times 26 \times 209$$

$$= 4618.90 \text{ watt}$$

- Heat flux tiap elemen

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

Dimana:

$q_1$  : *heat flux* pada elemen ( $J/mm^2$ )

$q_e$  : *heat flux* yang dihasilkan elektroda ( $J/mm^2$ )

$A_1$  : luas permukaan elemen ( $mm^2$ )

$A_f$  : luasan fluks yang dihasilkan elektroda ( $mm^2$ )

➤ Menghitung *Heat Flux* Elektroda

$$q_e = \frac{Q}{A_f} \quad ; \quad A_f : \text{luasan fluks yang dihasilkan elektroda}$$

$$q_e = \frac{Q}{\pi r^2} \quad ; \quad r : \text{jari-jari elektroda}$$

$$q_e = \frac{4618.90}{\pi 0,6^2}$$

$$q_e = 4086.076 \text{ watt/mm}^2$$

➤ Menghitung Luas Elemen

Luas elemen dihitung menggunakan dengan pendekatan trapesium untuk satu area las dibagi dengan jumlah elemen pada area las tersebut.

$$A_1 = \frac{\left(\frac{p_1 + p_2}{2}\right) \times l}{n \text{ elemen}}$$

dengan,

$$p_1 = 68.326 \text{ mm}$$

$$p_2 = 71.628 \text{ mm}$$

$$l = 10.922 \text{ mm}$$

$$n \text{ elemen} = 40$$

maka,

$$A_1 = \frac{\left(\frac{68.326 + 71.628}{2}\right) \times 10.922}{40}$$

$$A_1 = 19.10722 \text{ mm}^2$$

➤ Menghitung Luasan *Flux* yang Dihasilkan Elektroda

$$A_f = b \cdot v \cdot t$$

dengan,

$$b = 71.628 \text{ mm}$$

$$v = 2.4667 \text{ mm/s}$$

$$t = 29.04 \text{ s}$$

maka,

$$A_f = b \cdot v \cdot t$$

$$A_f = 189.99 \times 2.4667 \times 29.04$$

$$A_f = 5130.57 \text{ mm}^2$$



Setelah melakukan perhitungan-perhitungan di atas, selanjutnya adalah melakukan perhitungan *heat flux*.

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

$$q_1 = 4086.076 \frac{19.10722}{5130.57}$$

$$q_1 = 15.22 \text{ watt/mm}^2$$

$$q_1 = 15.22 \times 10^6 \text{ watt/m}^2$$

Dari perhitungan di atas diketahui beban heat flux yang mengenai elemen adalah sebesar  $15.22 \times 10^6 \text{ watt/m}^2$ . Beban *heat flux* ini akan diaplikasikan pada tiap elemen secara *transient*.

## 2. Beban Heat Flux untuk Brace 3 dan 4

- Heat input

$$Q = \eta U I$$

Dimana:

Q : Net heat input (Watt)

$\eta$  : Koefisien efisiensi

U : Tegangan busur (Volt)

I : Arus listrik (Ampere)

Dengan

$$Q = 0.85$$

$$U = 26 \text{ volt}$$

$$I = 209 \text{ Ampere}$$

Maka,

$$Q = \eta U I$$

$$= 0.85 \times 26 \times 209$$

$$= 4618.90 \text{ watt}$$

- Heat flux tiap elemen

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

Dimana:

$q_1$  : *heat flux* pada elemen ( $\text{J/mm}^2$ )

$q_e$  : *heat flux* yang dihasilkan elektroda ( $\text{J/mm}^2$ )

$A_1$  : luas permukaan elemen ( $\text{mm}^2$ )

$A_f$  : luasan fluks yang dihasilkan elektroda ( $\text{mm}^2$ )

➤ Menghitung *Heat Flux* Elektroda

$$q_e = \frac{Q}{A_f} ; \quad A_f : \text{luasan fluks yang dihasilkan elektroda}$$

$$q_e = \frac{Q}{\pi r^2} ; \quad r : \text{jari-jari elektroda}$$

$$q_e = \frac{4618.90}{\pi 0,6^2}$$

$$q_e = 4086.076 \text{ watt/mm}^2$$

➤ Menghitung Luas Elemen

Luas elemen dihitung menggunakan dengan pendekatan trapesium untuk satu area las dibagi dengan jumlah elemen pada area las tersebut.

$$A_1 = \frac{\left(\frac{p_1 + p_2}{2}\right) \times l}{n \text{ elemen}}$$

dengan,

$$p_1 = 90.17 \text{ mm}$$

$$p_2 = 93.98 \text{ mm}$$

$$l = 12.7 \text{ mm}$$

$$n \text{ elemen} = 42$$

maka,

$$A_1 = \frac{\left(\frac{90.17 + 93.98}{2}\right) \times 12.7}{42}$$

$$A_1 = 29.23 \text{ mm}^2$$

➤ Menghitung Luasan *Flux* yang Dihasilkan Elektroda

$$A_f = b \cdot v \cdot t$$

dengan,

$$b = 93.98 \text{ mm}$$

$$v = 2.4667 \text{ mm/s}$$

$$t = 31.8 \text{ s}$$

maka,

$$A_f = b \cdot v \cdot t$$

$$A_f = 93.98 \times 2.4667 \times 31.8$$

$$A_f = 8832.24 \text{ mm}^2$$

Setelah melakukan perhitungan-perhitungan di atas, selanjutnya adalah melakukan perhitungan *heat flux*.

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

$$q_1 = 4086.076 \frac{29.23}{8832.24}$$

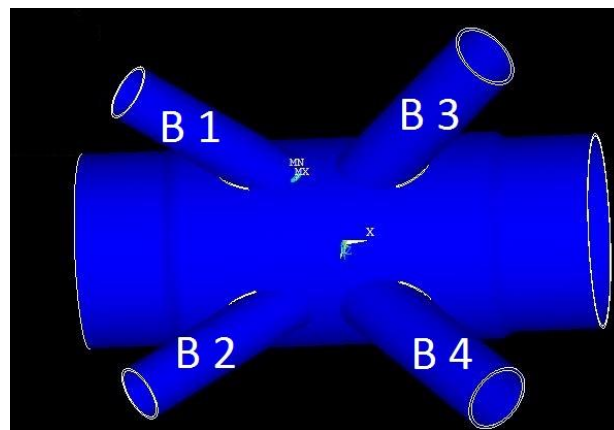
$$q_1 = 13.52 \text{ watt/mm}^2$$

$$q_1 = 13.52 \times 10^6 \text{ watt/m}^2$$

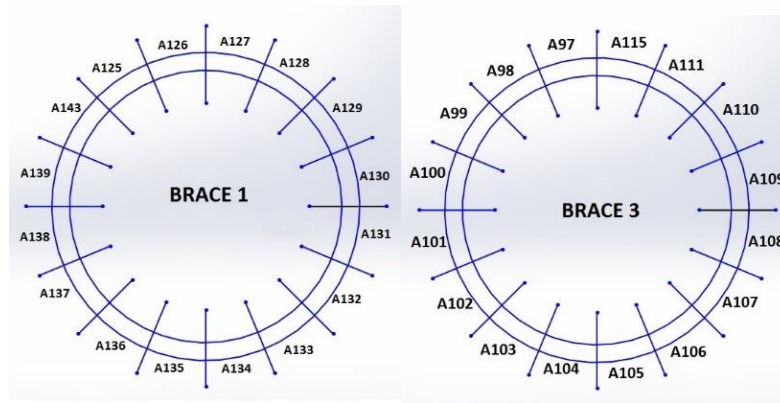
Dari perhitungan di atas diketahui beban heat flux yang mengenai elemen adalah sebesar  $13.52 \times 10^6 \text{ watt/m}^2$ . Beban *heat flux* ini akan diaplikasikan pada tiap elemen secara *transient*.

#### 4.5. VARIASI URUTAN DAN AREA PENGELASAN

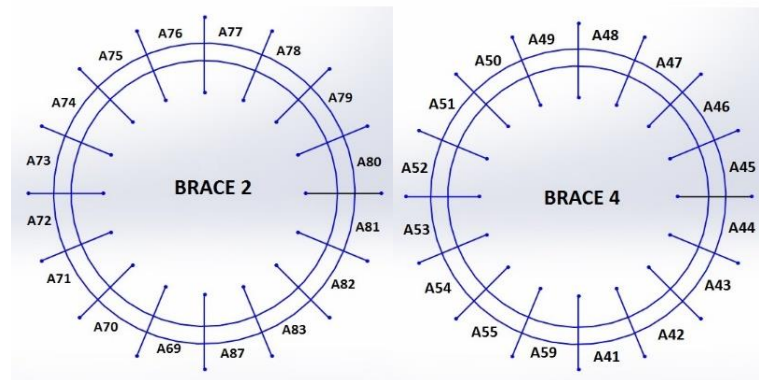
Untuk mengetahui besarnya tegangan sisa yang terbentuk, maka digunakan beberapa variasi dalam simulasi pengelasan. Variasi dalam hal ini yaitu penentuan urutan pengelasan pada sambungan brace. Penomoran brace untuk menentukan urutan pengelasan akan dijelaskan pada Gambar 4.5. Sedangkan untuk area pengelasan sambungan sendiri terbagi menjadi 16 area las yang akan dijelaskan pada Gambar 4.6 dan 4.7 berikut :



**Gambar 4. 5** Urutan Simulasi Pengelasan pada Brace



**Gambar 4. 6** Pembagian Area Pengelasan pada Brace 1 dan 3



**Gambar 4. 7** Pembagian Area Pengelasan pada Brace 2 dan 4.

Dalam tugas akhir ini dilakukan beberapa variasi dalam simulasi pengelasan sambungan tubular, yaitu variasi dalam urutan pengelasan. Variasi tersebut dibagi dalam 4 *load case* simulasi urutan pengelasan, yaitu :

### 1. Load case 1

Urutan pengelasan secara berurutan dari brace 1 kemudian brace 2 selanjutnya brace 3 dan 4. Sedangkan untuk jumlah loadstep dalam loadcase ini yaitu masing-masing brace 16 loadstep ditambah 1 (satu) loadstep pendinginan selama 7200 s, jadi jumlah total 65 loadstep. Urutan Loadstep simulasi pengelasan akan dijelaskan pada tabel 4.3 berikut ini.

**Tabel 4. 3** Loadstep dan Area Pengelasan Loadcase 1

BRACE 1			BRACE 2		
Area	Time	Loadstep	Area	Time	Loadstep
130	29.03838	1	80	493.6524	17
131	58.07676	2	81	522.6908	18

132	87.11514	3	82	551.7292	19
133	116.1535	4	83	580.7676	20
134	145.1919	5	87	609.8059	21
135	174.2303	6	69	638.8443	22
136	203.2686	7	70	667.8827	23
137	232.307	8	71	696.9211	24
138	261.3454	9	72	725.9595	25
139	290.3838	10	73	754.9978	26
143	319.4222	11	74	784.0362	27
125	348.4605	12	75	813.0746	28
126	377.4989	13	76	842.113	29
127	406.5373	14	77	871.1514	30
128	435.5757	15	78	900.1897	31
129	464.6141	16	79	929.2281	32
BRACE 3			Brace 4		
Area	Time	Loadstep	Area	Time	Loadstep
100	967.3281	33	52	1576.928	49
99	1005.428	34	51	1615.028	50
98	1043.528	35	50	1653.128	51
97	1081.628	36	49	1691.228	52
115	1119.728	37	48	1729.328	53
111	1157.828	38	47	1767.428	54
110	1195.928	39	46	1805.528	55
109	1234.028	40	45	1843.628	56
108	1272.128	41	44	1881.728	57
107	1310.228	42	43	1919.828	58
106	1348.328	43	42	1957.928	59
105	1386.428	44	41	1996.028	60
104	1424.528	45	59	2034.128	61
103	1462.628	46	55	2072.228	62
102	1500.728	47	54	2110.328	63
101	1538.828	48	53	2148.428	64

## 2. Load case 2

Urutan pengelasan dilakukan dengan urutan brace 1 dan 2 secara bersamaan kemudian dilanjutkan dengan brace 3 dan 4 secara bersamaan. Sedangkan untuk jumlah loadstep dalam loadcase ini yaitu masing-masing brace 16 loadstep ditambah 1 (satu) loadstep pendinginan selama 7200 s, jadi jumlah total 33 loadstep. Urutan Loadstep simulasi pengelasan akan dijelaskan pada tabel 4.4 berikut ini.

**Tabel 4. 4** Loadstep dan Area Pengelasan Loadcase 2

<b>BRACE 1</b>	<b>BRACE 2</b>	<b>Time</b>	<b>Loadstep</b>	<b>BRACE 3</b>	<b>Brace 4</b>	<b>Time</b>	<b>Loadstep</b>
<b>Area</b>	<b>Area</b>			<b>Area</b>	<b>Area</b>		
130	80	29.03	1	100	52	493.65	17
131	81	58.07	2	99	51	522.69	18
132	82	87.11	3	98	50	551.72	19
133	83	116.15	4	97	49	580.76	20
134	87	145.19	5	115	48	609.80	21
135	69	174.23	6	111	47	638.84	22
136	70	203.26	7	110	46	667.88	23
137	71	232.30	8	109	45	696.92	24
138	72	261.34	9	108	44	725.95	25
139	73	290.38	10	107	43	754.99	26
143	74	319.42	11	106	42	784.03	27
125	75	348.46	12	105	41	813.07	28
126	76	377.49	13	104	59	842.11	29
127	77	406.53	14	103	55	871.15	30
128	78	435.57	15	102	54	900.18	31
129	79	464.61	16	101	53	929.22	32

### 3. Load case 3

Urutan pengelasan secara berurutan dari brace 1 dan 3 secara bersamaan kemudian dilanjutkan dengan brace 2 dan 4 secara bersamaan. Urutan pengelasan dilakukan dengan urutan brace 1 dan 2 secara bersamaan kemudian dilanjutkan dengan brace 3 dan 4 secara bersamaan. Sedangkan untuk jumlah loadstep dalam loadcase ini yaitu masing-masing brace 16 loadstep ditambah 1 (satu) loadstep pendinginan selama 7200 s, jadi jumlah total 33 loadstep. Urutan Loadstep simulasi pengelasan akan dijelaskan pada tabel 4.5 berikut ini.

**Tabel 4. 5** Loadstep dan Area Pengelasan Loadcase 3

<b>BRACE 1</b>	<b>BRACE 3</b>	<b>Time</b>	<b>Loadstep</b>	<b>BRACE 2</b>	<b>Brace 4</b>	<b>Time</b>	<b>Loadstep</b>
<b>Area</b>	<b>Area</b>			<b>Area</b>	<b>Area</b>		
130	100	38.1	1	80	52	647.7	17
131	99	76.2	2	81	51	685.8	18
132	98	114.3	3	82	50	723.9	19
133	97	152.4	4	83	49	762	20
134	115	190.5	5	87	48	800.1	21
135	111	228.6	6	69	47	838.2	22

136	110	266.7	7	70	46	876.3	23
137	109	304.8	8	71	45	914.4	24
138	108	342.9	9	72	44	952.5	25
139	107	381	10	73	43	990.6	26
143	106	419.1	11	74	42	1028.7	27
125	105	457.2	12	75	41	1066.8	28
126	104	495.3	13	76	59	1104.9	29
127	103	533.4	14	77	55	1143	30
128	102	571.5	15	78	54	1181.1	31
129	101	609.6	16	79	53	1219.2	32

#### 4. Load case 4

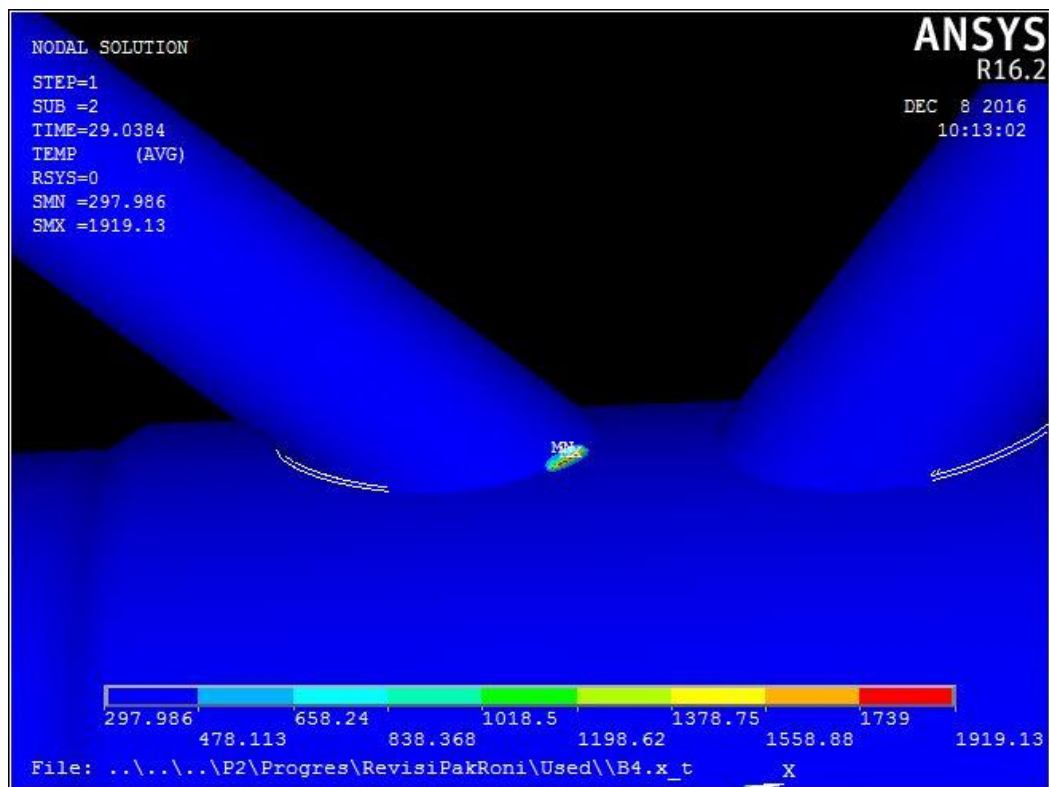
Urutan pengelasan dilakukan secara bersamaan atau simultan dari brace 1, 2, 3, dan 4. Urutan pengelasan dilakukan dengan urutan brace 1 dan 2 secara bersamaan kemudian dilanjutkan dengan brace 3 dan 4 secara bersamaan. Sedangkan untuk jumlah loadstep dalam loadcase ini yaitu masing-masing brace 16 loadstep ditambah 1 (satu) loadstep pendinginan, jadi jumlah total 17 loadstep. Urutan Loadstep simulasi pengelasan akan dijelaskan pada tabel 4.6 berikut ini.

**Tabel 4. 6** Loadstep dan Area Pengelasan Loadcase 4

<b>BRACE 1</b>	<b>BRACE 2</b>	<b>BRACE 3</b>	<b>BRACE 4</b>	<b>Time</b>	<b>Loadstep</b>
Area	Area	Area	Area		
130	80	100	52	38.1	1
131	81	99	51	76.2	2
132	82	98	50	114.3	3
133	83	97	49	152.4	4
134	87	115	48	190.5	5
135	69	111	47	228.6	6
136	70	110	46	266.7	7
137	71	109	45	304.8	8
138	72	108	44	342.9	9
139	73	107	43	381	10
143	74	106	42	419.1	11
125	75	105	41	457.2	12
126	76	104	59	495.3	13
127	77	103	55	533.4	14
128	78	102	54	571.5	15
129	79	101	53	609.6	16

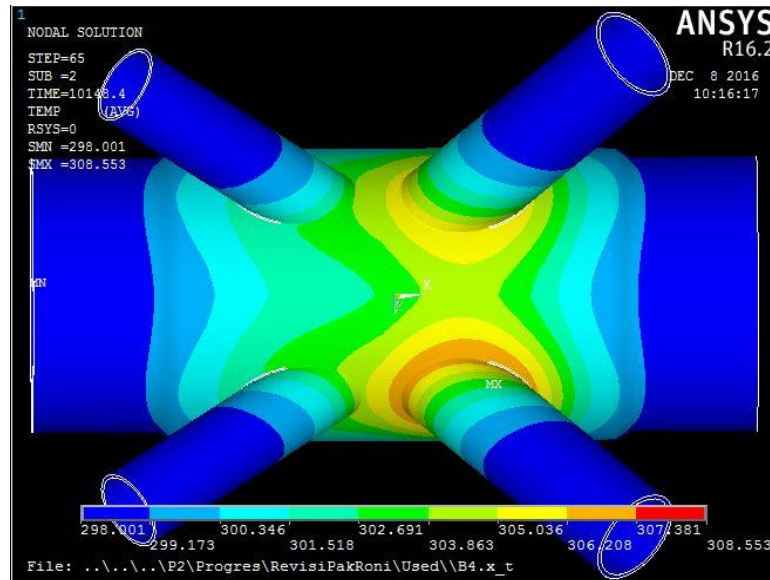
#### 4.6. HASIL ANALISA *THERMAL*

Pada saat pengelasan terjadi beban panas yang dapat menyebabkan terjadinya regangan dan tegangan pada daerah yang terkena dampak lasan. Selain itu simulasi pengelasan dalam tugas akhir ini juga menghasilkan distribusi panas daerah sekitar lasan. Suhu pengelasan yang ditinjau yaitu pada saat Loadstep 1 atau pada saat awal pengelasan. Berikut adalah gambar ilustrasi pengelasan dan distribusi panas setelah pendinginan yang akan dijelaskan pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9



**Gambar 4. 8** Ilustrasi Pengelasan pada Software ANSYS APDL 16.2

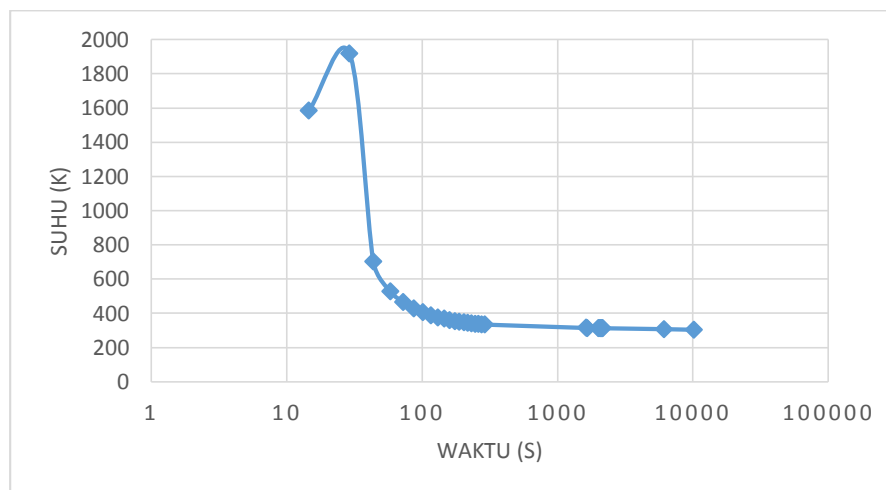




**Gambar 4. 9** Distribusi Panas Kondisi Akhir/Pendinginan

#### 4.6.1.DISTRIBUSI PANAS *LOAD CASE 1*

Pada loadcase 1 titik yang ditinjau untuk mengetahui suhu pengelasan adalah pada nodes 36843 yaitu saat loadstep 1 atau berada pada titik awal pengelasan. Dari Gambar 4.10 diketahui bahwa suhu awal pengelasan yaitu 1919,13 K. Setelah itu suhu menurun mendekati suhu kamar (298 K) sesuai dengan lamanya waktu pendinginan.

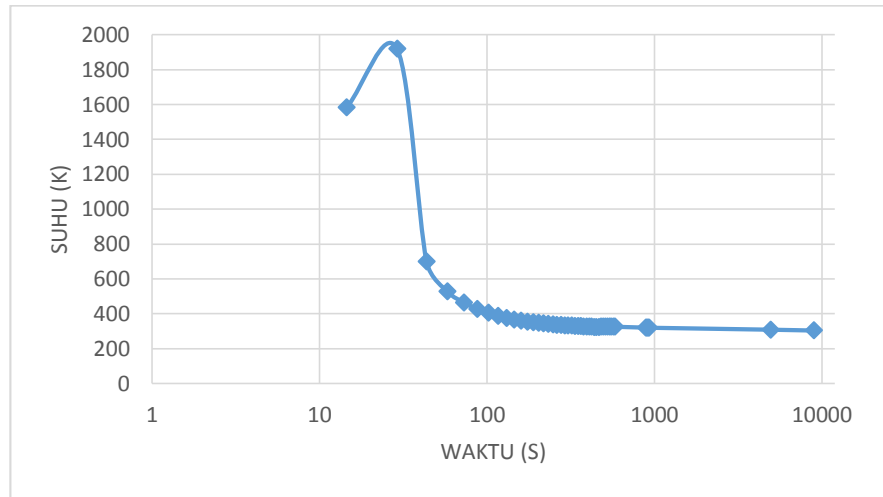


**Gambar 4. 10** Distribusi Temperatur pada *LoadStep 1*

#### 4.6.2.DISTRIBUSI PANAS *LOAD CASE 2*

Pada loadcase 2 titik yang ditinjau untuk mengetahui suhu pengelasan adalah pada nodes 21474 yaitu saat loadstep 1 atau berada pada titik awal pengelasan. Dari Gambar 4.11 diketahui bahwa suhu awal pengelasan yaitu 1921,1 K. Setelah itu

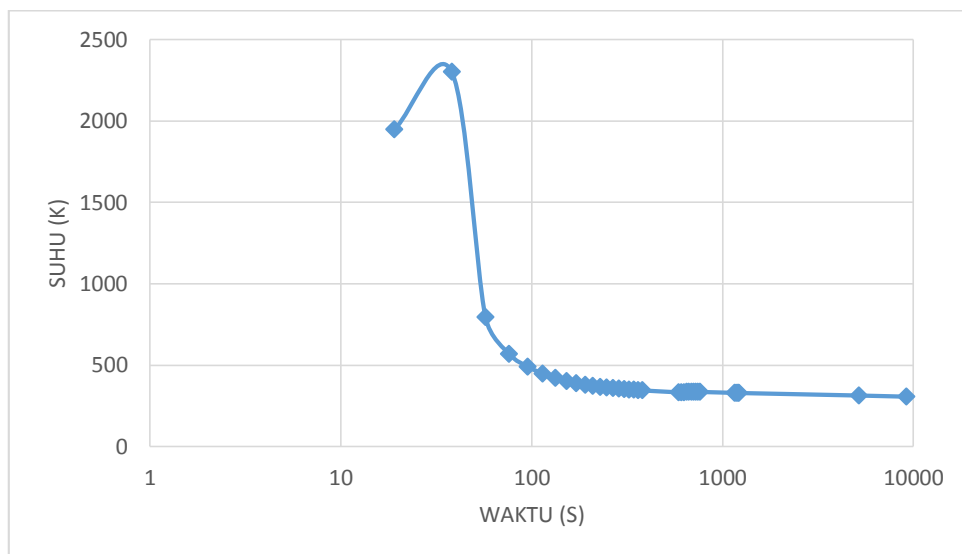
suhu menurun mendekati suhu kamar (298 K) sesuai dengan lamanya waktu pendinginan.



**Gambar 4. 11** Distribusi Temperatur pada *LoadStep* 1

#### 4.6.3. DISTRIBUSI PANAS LOAD CASE 3

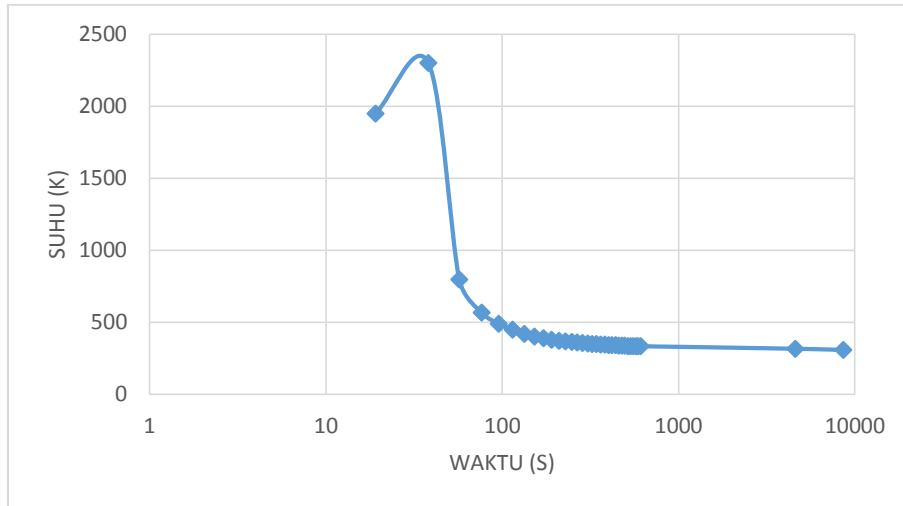
Pada loadcase 3 titik yang ditinjau untuk mengetahui suhu pengelasan adalah pada nodes 28143 yaitu saat loadstep 1 atau berada pada titik awal pengelasan. Dari Gambar 4.12 diketahui bahwa suhu awal pengelasan yaitu 2301,39 K. Setelah itu suhu menurun mendekati suhu kamar (298 K) sesuai dengan lamanya waktu pendinginan.



**Gambar 4. 12** Distribusi Temperatur pada *LoadStep* 1

#### 4.6.4. DISTRIBUSI PANAS *LOAD CASE 4*

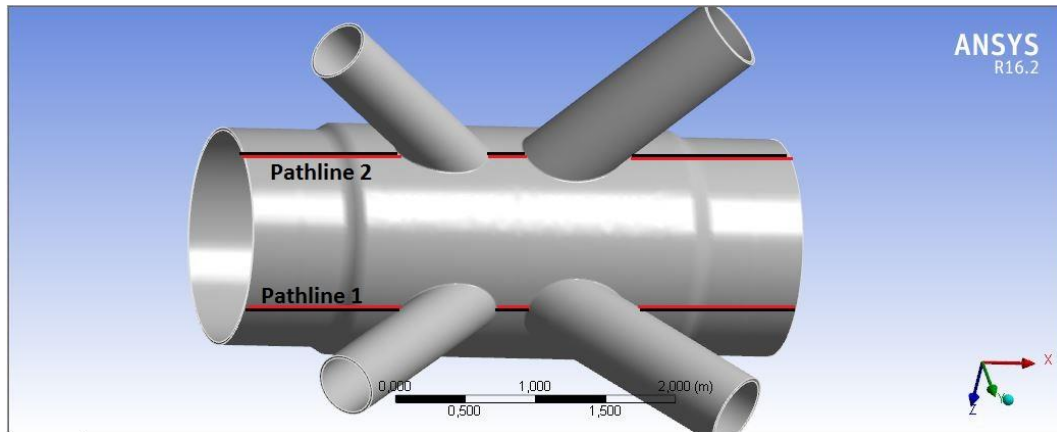
Pada loadcase 4 titik yang ditinjau untuk mengetahui suhu pengelasan adalah pada nodes 31876 yaitu saat loadstep 1 atau berada pada titik awal pengelasan. Dari Gambar 4.13 diketahui bahwa suhu awal pengelasan yaitu 2301,13 K. Setelah itu suhu menurun mendekati suhu kamar (298 K) sesuai dengan lamanya waktu pendinginan.



**Gambar 4. 13** Distribusi Temperatur pada *LoadStep 1*

#### 4.7. HASIL ANALISA TEGANGAN SISA

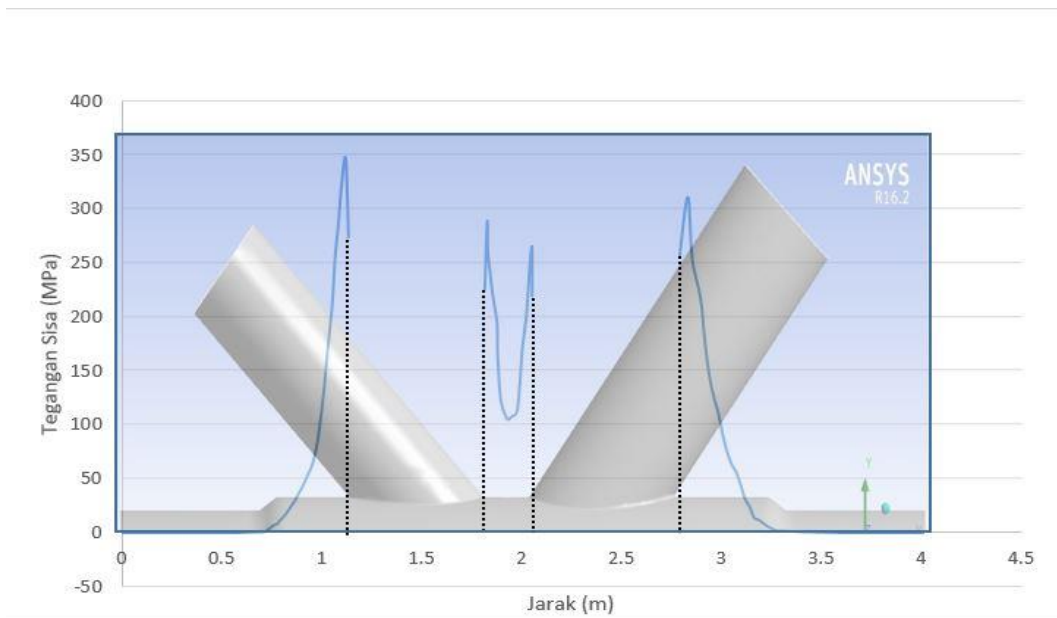
Tegangan sisa memiliki arah secara aksial dan tangensial, dalam analisa kali ini hanya digunakan tegangan sisa aksial saja. Penentuan tegangan sisa aksial juga berdasarkan pathline atau garis sumbu untuk mengetahui besarnya tegangan sisa tersebut. Pembacaan tegangan sisa dilakukan pada daerah permukaan chord yang sebelumnya telah di lakukan berdasarkan pathline yang telah dibuat. Pathline pada chord terdiri dari 2 bagian searah dengan sumbu-x dan melewati masing-masing area lasan pada brace. Gambar 4.14 menjelaskan pathline untuk menentukan nilai dari tegangan sisa.



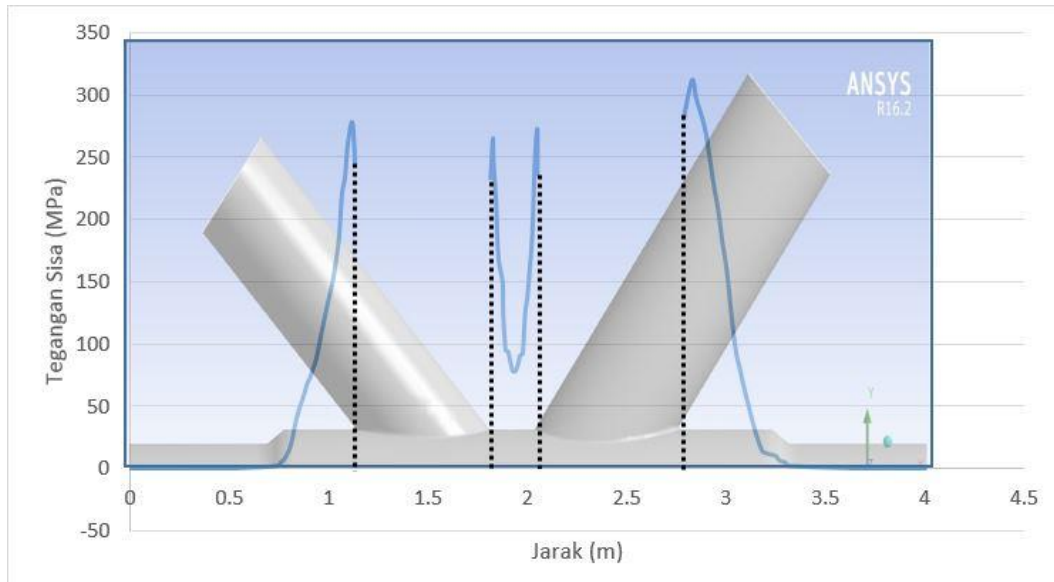
**Gambar 4. 14** Pathline pada Chord untuk Pembacaan Tegangan Sisa

#### **4.7.1.DISTRIBUSI TEGANGAN SISA AKSIAL *LOAD CASE 1***

Dalam Gambar 4.15 dan 4.16 terdapat grafik yang menunjukkan distribusi tegangan sisa arah aksial sesuai dengan pathline yang telah ditentukan. Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan merupakan tegangan tarik dan memiliki nilai tegangan terbesar. Sedangkan di titik yang berjarak semakin jauh dengan weldtoe maka nilainya akan semakin mendekati 0 (nol). Pada loadcase 1 nilai tegangan sisa maksimal adalah sebesar 347.21 MPa dan nilainya semakin menurun seiring dengan jarak yang mejaui dari weldtoe.



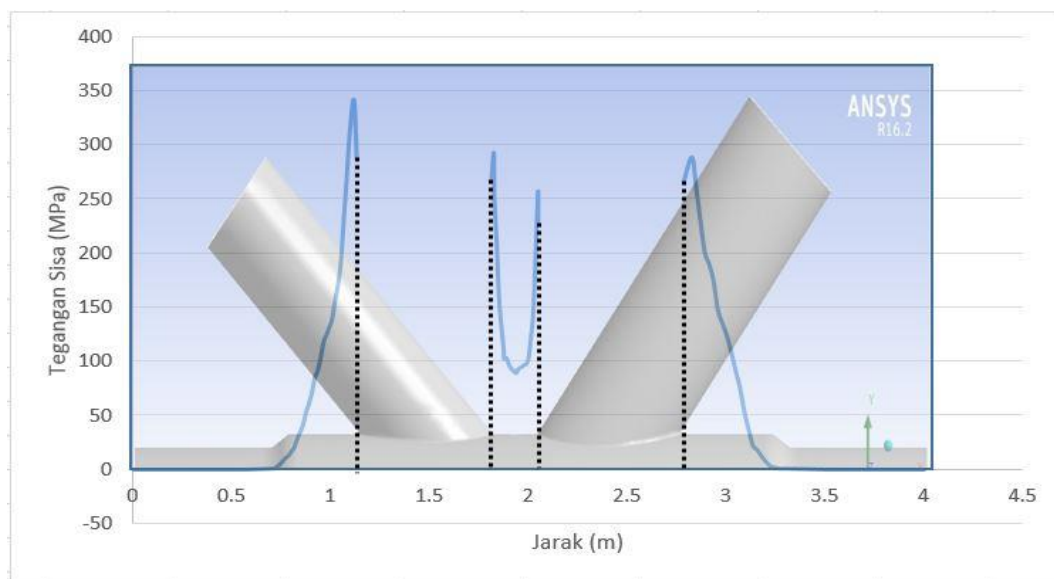
**Gambar 4. 15** Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 1 – Loadcase 1



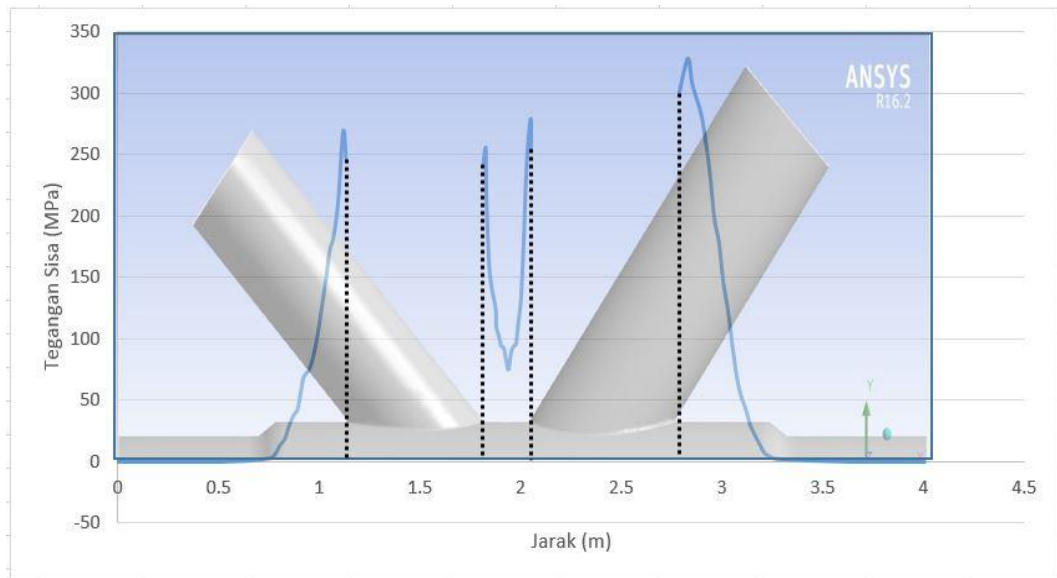
**Gambar 4. 16** Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 2 – Loadcase 1

#### 4.7.2.DISTRIBUSI TEGANGAN SISA AKSIAL *LOAD CASE 2*

Gambar 4.17 dan 4.18 terdapat grafik yang menunjukkan distribusi tegangan sisa arah aksial sesuai dengan pathline yang telah ditentukan. Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan merupakan tegangan tarik dan memiliki nilai tegangan terbesar. Sedangkan di titik yang berjarak semakin jauh dengan weldtoe maka nilainya akan semakin mendekati 0 (nol). Pada loadcase 2 nilai tegangan sisa maksimal adalah sebesar 341.08 MPa dan nilainya semakin menurun seiring dengan jarak yang mejauh dari *weldtoe*.



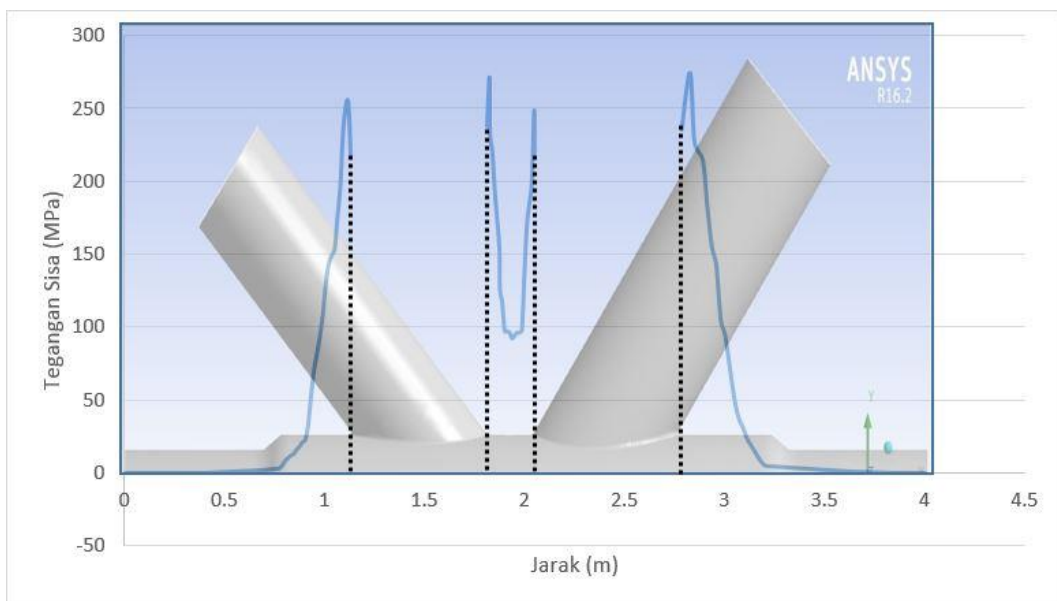
**Gambar 4. 17** Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 1 – Loadcase 2



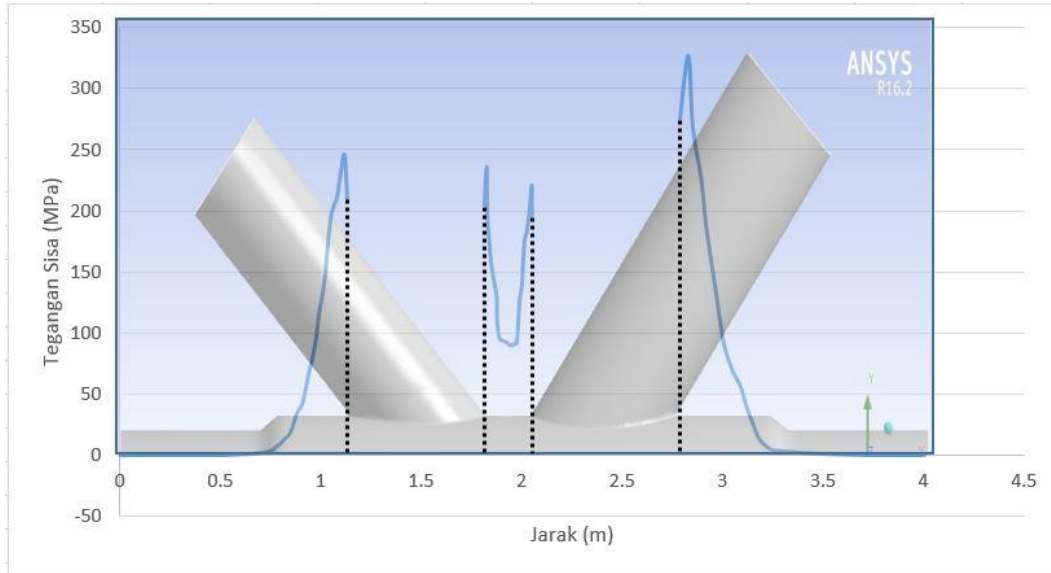
**Gambar 4. 18** Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 2 – Loadcase 2

#### 4.7.3.DISTRIBUSI TEGANGAN SISA AKSIAL *LOAD CASE 3*

Pada Gambar 4.19 dan 4.20 terdapat grafik yang menunjukkan distribusi tegangan sisa arah aksial sesuai dengan pathline yang telah ditentukan. Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan merupakan tegangan tarik dan memiliki nilai tegangan terbesar. Sedangkan di titik yang berjarak semakin jauh dengan weldtoe maka nilainya akan semakin mendekati 0 (nol). Pada loadcase 3 nilai tegangan sisa maksimal adalah sebesar 326.9 MPa dan nilainya semakin menurun seiring dengan jarak yang mejauh dari *weldtoe*.



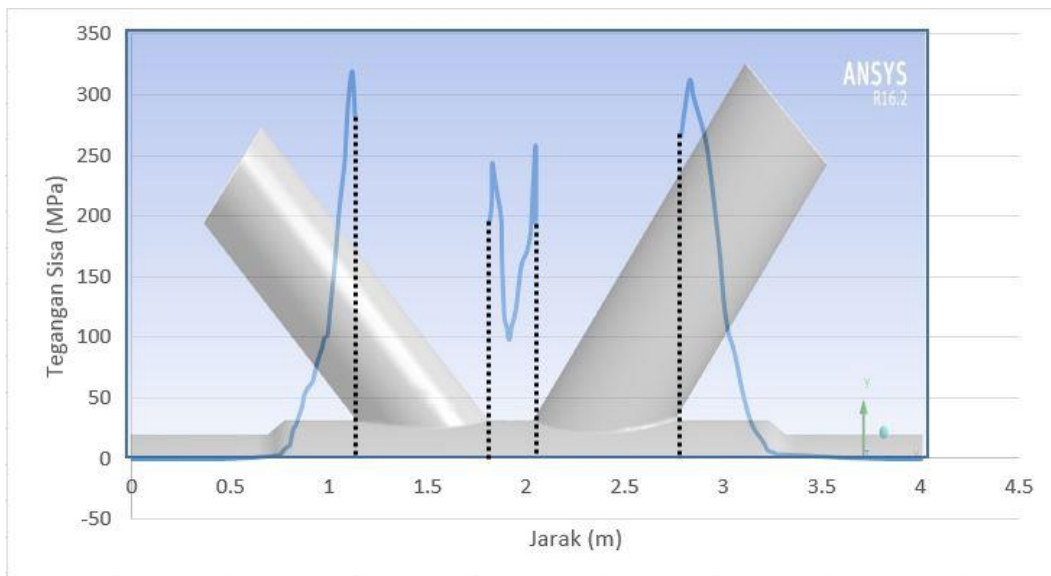
**Gambar 4. 19** Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 1 – Loadcase 3



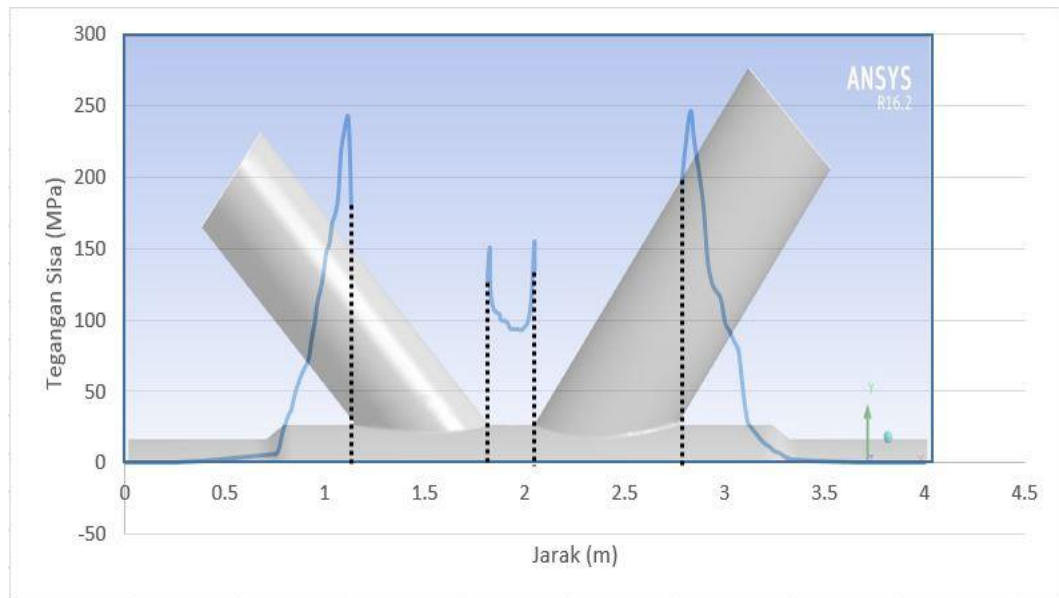
**Gambar 4. 20** Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 2 – Loadcase 3

#### **4.7.4. DISTRIBUSI TEGANGAN SISA AKSIAL *LOAD CASE 4***

Pada Gambar 4.21 dan 4.22 terdapat grafik yang menunjukkan distribusi tegangan sisa arah aksial sesuai dengan pathline yang telah ditentukan. Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan merupakan tegangan tarik dan memiliki nilai tegangan terbesar. Sedangkan di titik yang berjarak semakin jauh dengan weldtoe maka nilainya akan semakin mendekati 0 (nol). Pada loadcase 4 nilai tegangan sisa maksimal adalah sebesar 319.44 MPa dan nilainya semakin menurun seiring dengan jarak yang mejauh dari *weldtoe*.



**Gambar 4. 21** Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 1 – Loadcase 4



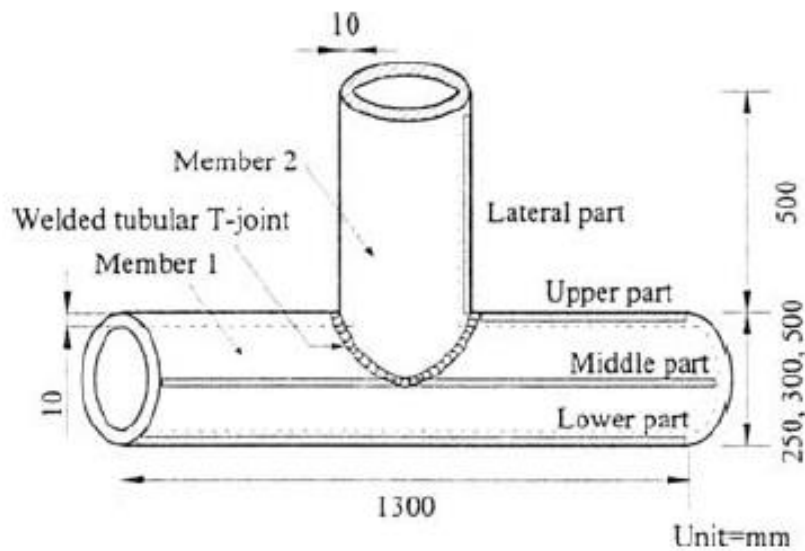
**Gambar 4. 22** Grafik Distribusi Tegangan Sisa Pathline 2 – Loadcase 4

#### 4.8. VALIDASI HASIL TEGANGAN SISA AKSIAL

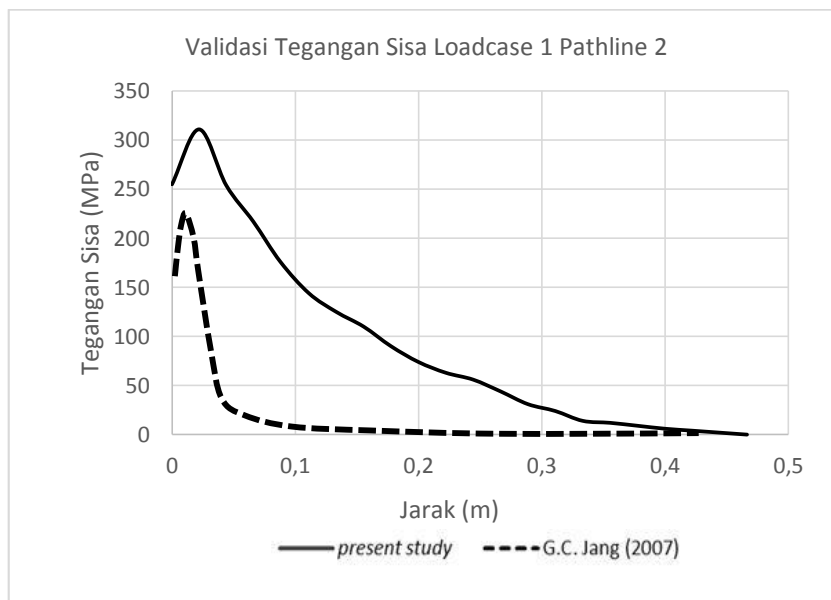
Setelah didapatkan grafik tegangan sisa aksial selanjutnya dilakukan validasi terhadap grafik tersebut, dalam hal ini menggunakan penelitian dari G.C. Jang yang melakukan penelitian terhadap tegangan sisa pada sambungan tubular tipe T. Karakteristik trend dari grafik tersebut dijadikan acuan untuk melakukan validasi apakah trend grafik pada tugas akhir ini sudah sesuai. Pada Gambar 4.23 menunjukkan geometri model referensi dan *pathline* untuk pembacaan tegangan sisa. Sedangkan parameter pengelasan dan bentuk geometri yang digunakan oleh G.C. Jang adalah sebagai berikut :

- a. Arus: 300 Ampere
- b. Voltase: 30 V
- c. Kecepatan: 6 mm/s
- d. Efisiensi pengelasan: 0,8
- e. Jenis material: SM 400.





**Gambar 4. 23** Model geometri yang digunakan untuk validasi G.C. Jang dkk (2007)

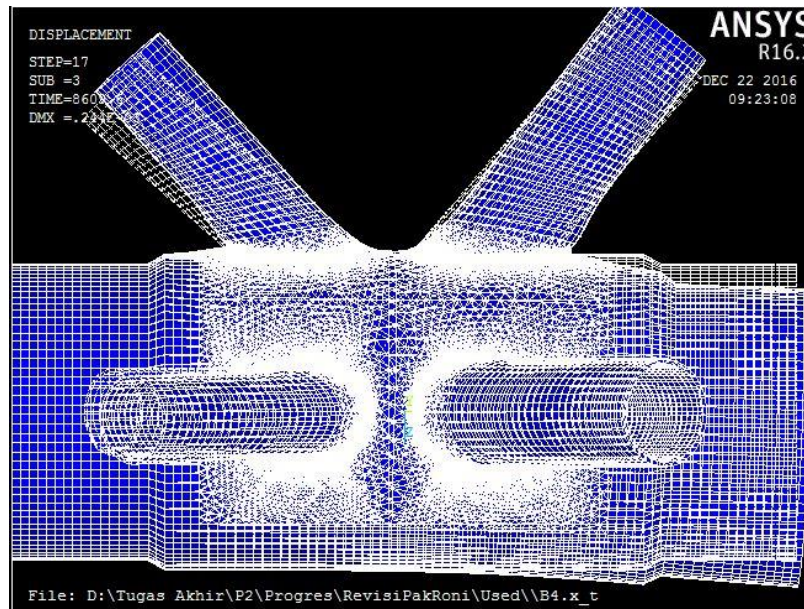


**Gambar 4. 24** Grafik Validasi Tegangan Sisa Aksial untuk Loadcase 1 Pathline 2

Pada Gambar 4.24 menunjukkan perbandingan tegangan sisa aksial bagian atas *chord*. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa tegangan sisa dari referensi dan tugas akhir memiliki trend distribusi yang sama. Trend distribusi tegangan sisa menunjukkan tegangan pada daerah weld toe memiliki nilai yang besar dan mengecil di jarak yang menjauhi weld toe.

#### 4.9. ANALISA TOTAL DEFORMASI

Dari hasil analisa deformasi didapatkan total deformasi terbesar berada pada ujung brace bagian kiri. Sebagai contoh pada gambar berikut ini ditampilkan total deformasi pada loadcase 4 dengan total deformasi terbesar. Berikut adalah Gambar 4.25 yang menjelaskan total deformasi pada loadcase 4



**Gambar 4. 25** Total deformasi pada loadcase 4

Dari gambar di atas distorsi yang terjadi pada brace sebelah kiri yaitu sebesar 0,24 m atau 24 cm. Nilai tersebut cukup besar dikarenakan ukuran model geometri yang digunakan juga besar. Sedangkan total deformasi yang terjadi pada loadcase 1 – 3 akan disajikan pada tabel berikut ini

**Tabel 4. 7** Total deformasi tiap-tiap loadcase

Loadcase	Total Deformasi (m)
Loadcase 1	0,21
Loadcase 2	0,23
Loadcase 3	0,23
Loadcase 4	0,24

#### 4.10. ANALISA TEGANGAN SISA SETELAH POST WELD HEAT TREATMENT

Simulasi *PWHT* ini dilakukan pada model dengan memberikan beban panas kembali sampai mencapai suhu tertentu dengan waktu tahan tertentu di daerah

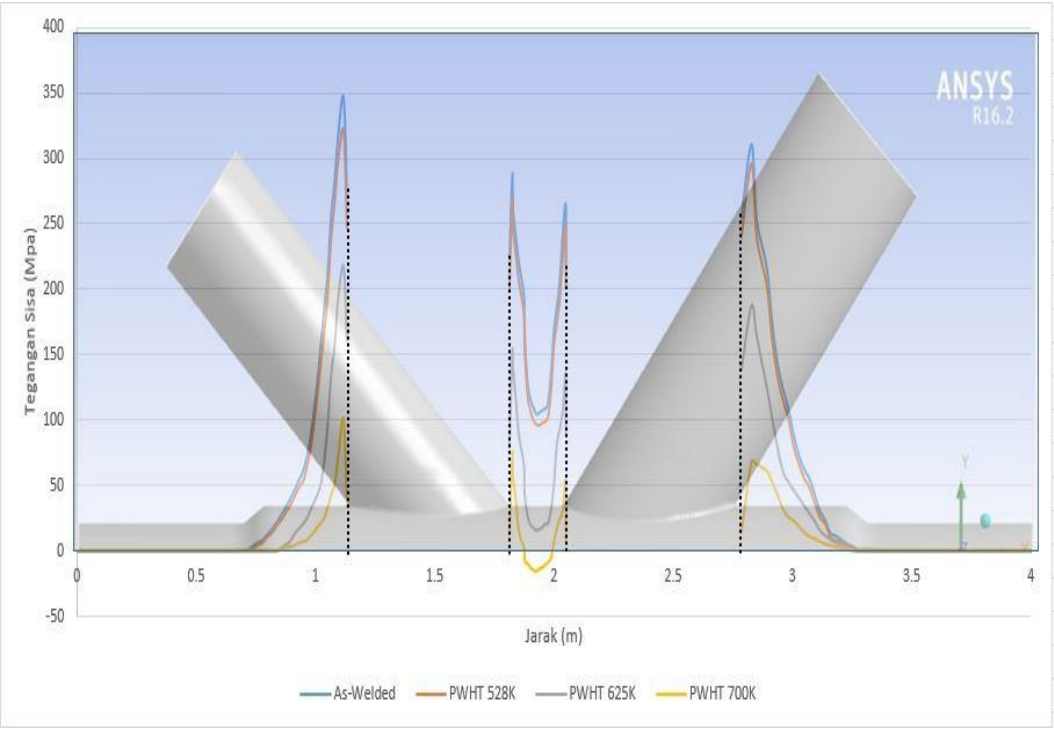
pengelasan. Dalam tugas akhir ini dilakukan 3 variasi *PWHT* seperti yang terinci pada Tabel 4.8 untuk melihat suhu dan waktu tahan yang membuat tegangan sisa berkurang banyak.

**Tabel 4. 8** Variasi Suhu dan Waktu Tahan Post Weld Heat Treatment

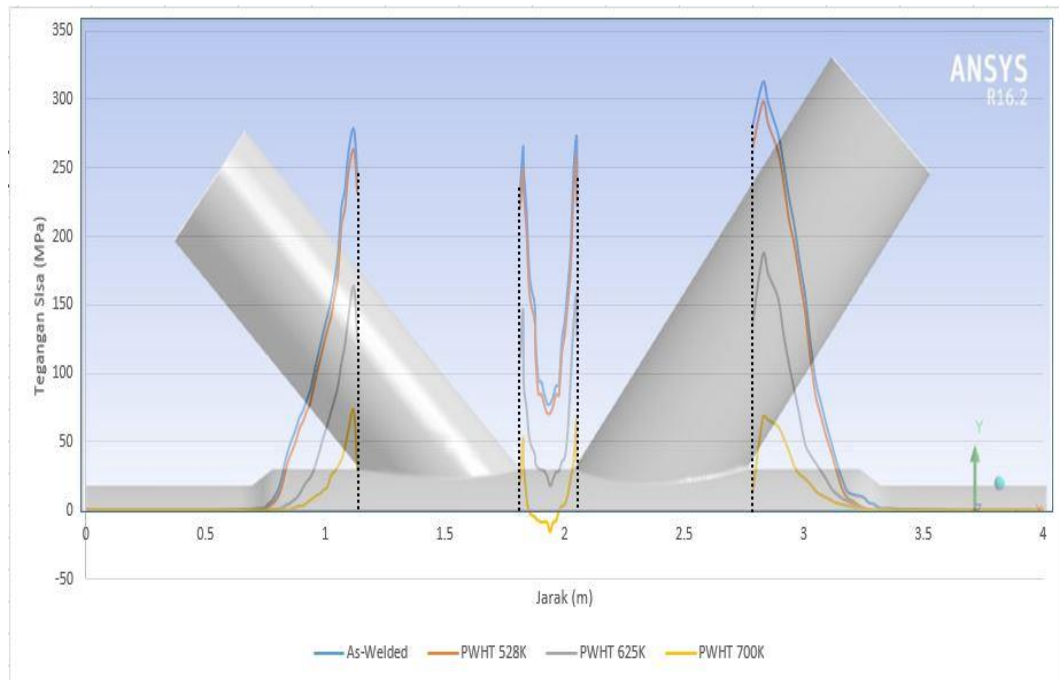
Suhu (K)	Waktu Tahan (jam)
528	4 jam
625	2,5 jam
700	2,5 jam

Untuk analisa tegangan sisa setelah *PWHT* akan ditinjau sesuai dengan pathline sebelum perlakuan *PWHT*. Tujuan dari *PWHT* adalah pengurangan tegangan sisa, sehingga analisa tegangan berfokus pada berkurangnya tegangan sisa. Berikut adalah grafik perbandingan tegangan sisa mulai dari loadcase 1 sampai dengan loadcase 4.

**1. Loadcase 1**

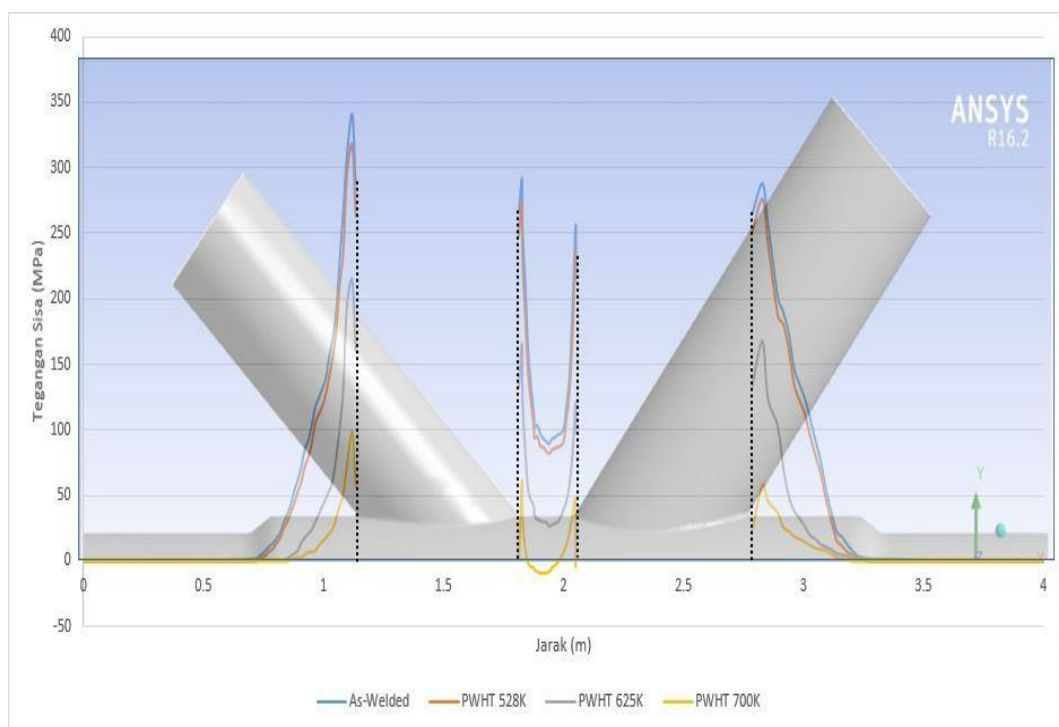


**Gambar 4. 26** Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah *PWHT* Loadcase 1 - Pathline 1

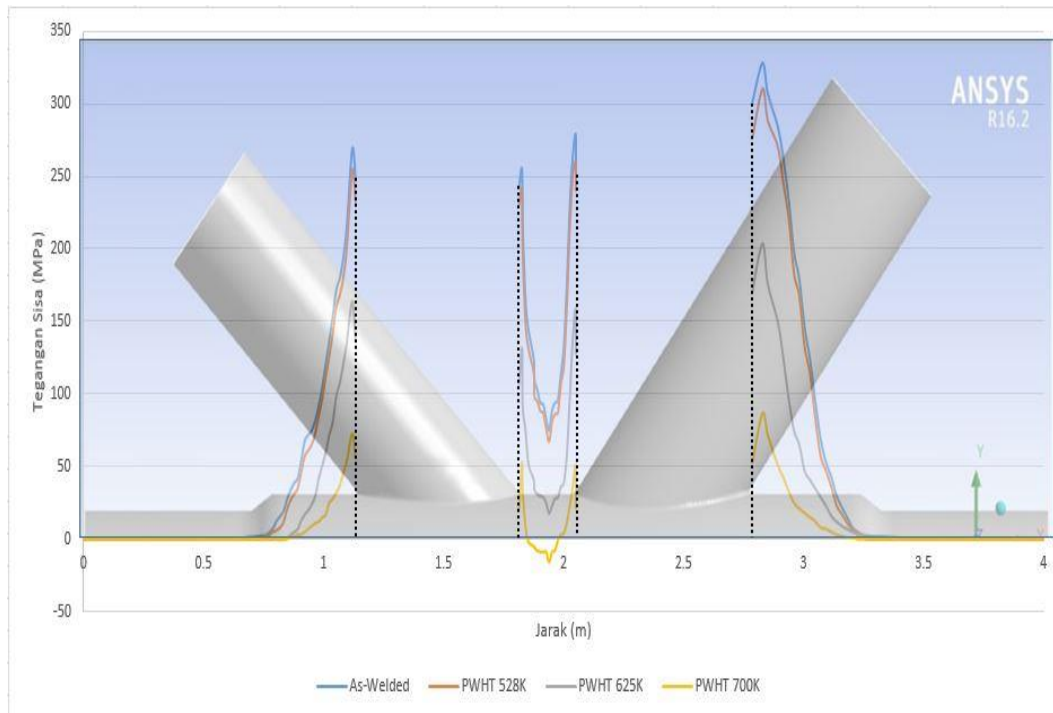


**Gambar 4. 27** Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Loadcase 1 - Pathline 2

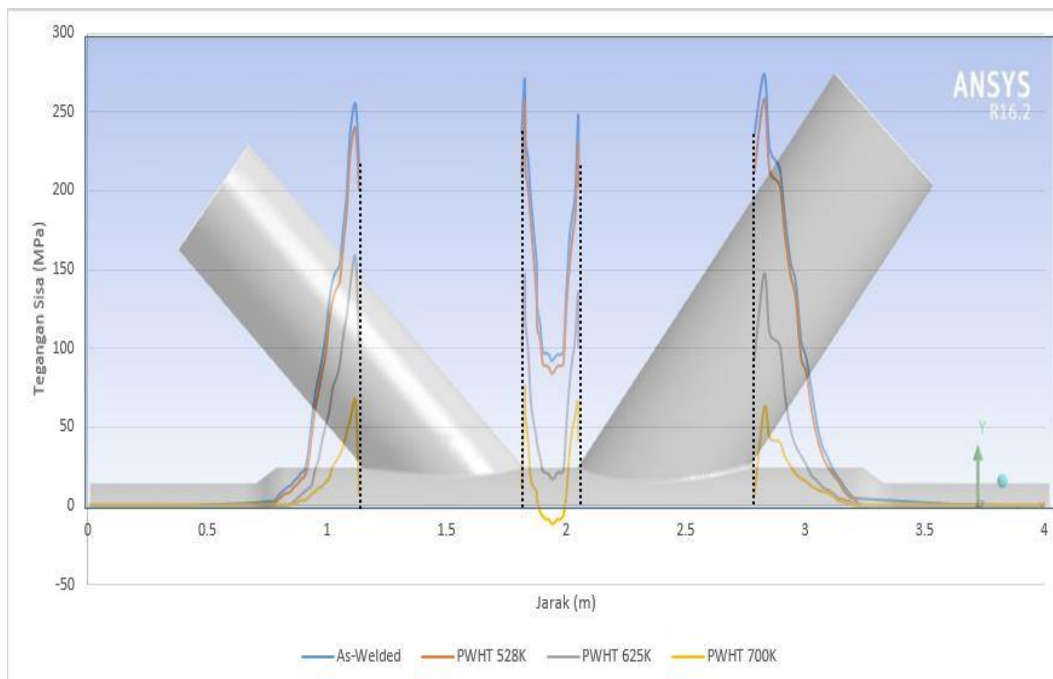
## 2. Loadcase 2



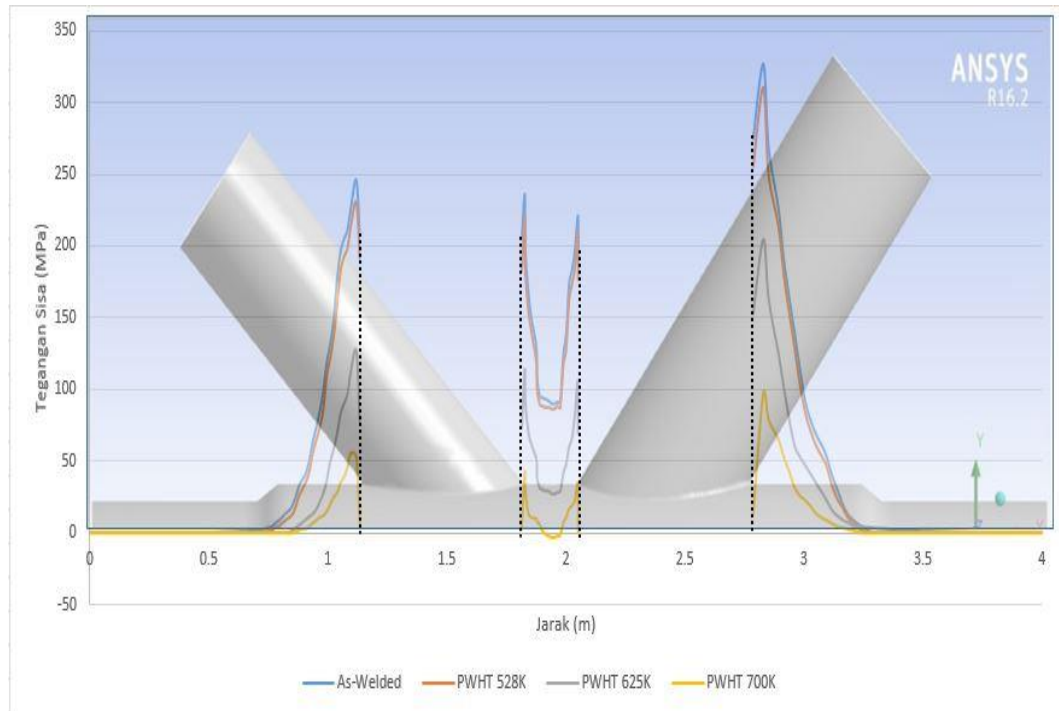
**Gambar 4. 28** Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Loadcase 2 - Pathline 1



**Gambar 4. 29** Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT  
Loadcase 2 - Pathline 2

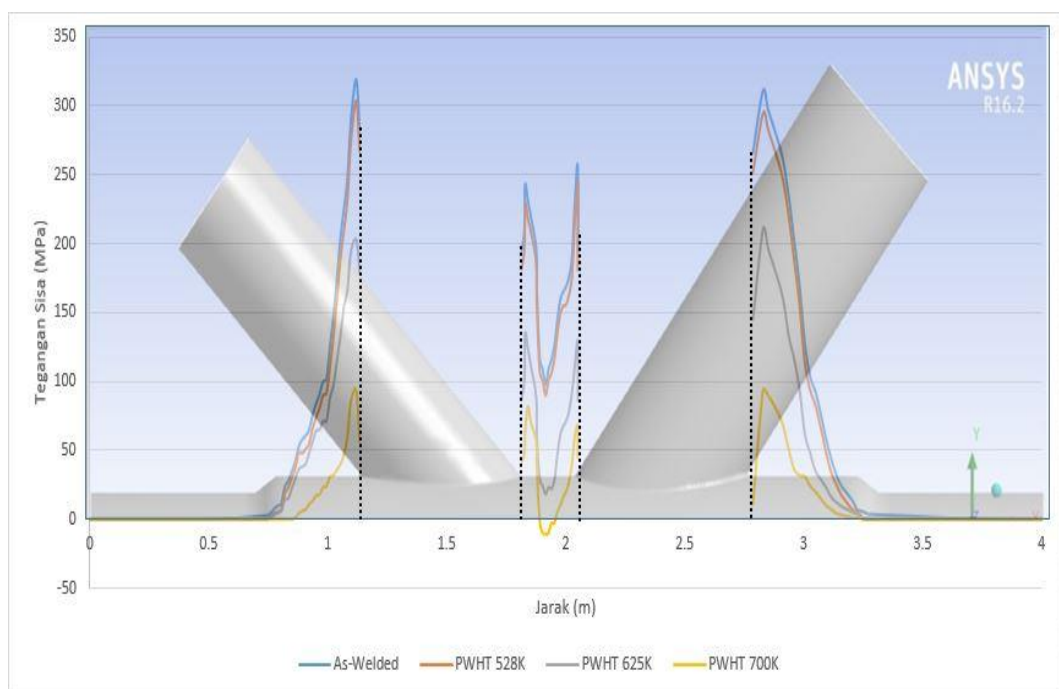


**Gambar 4. 30** Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT  
Loadcase 3 - Pathline 1



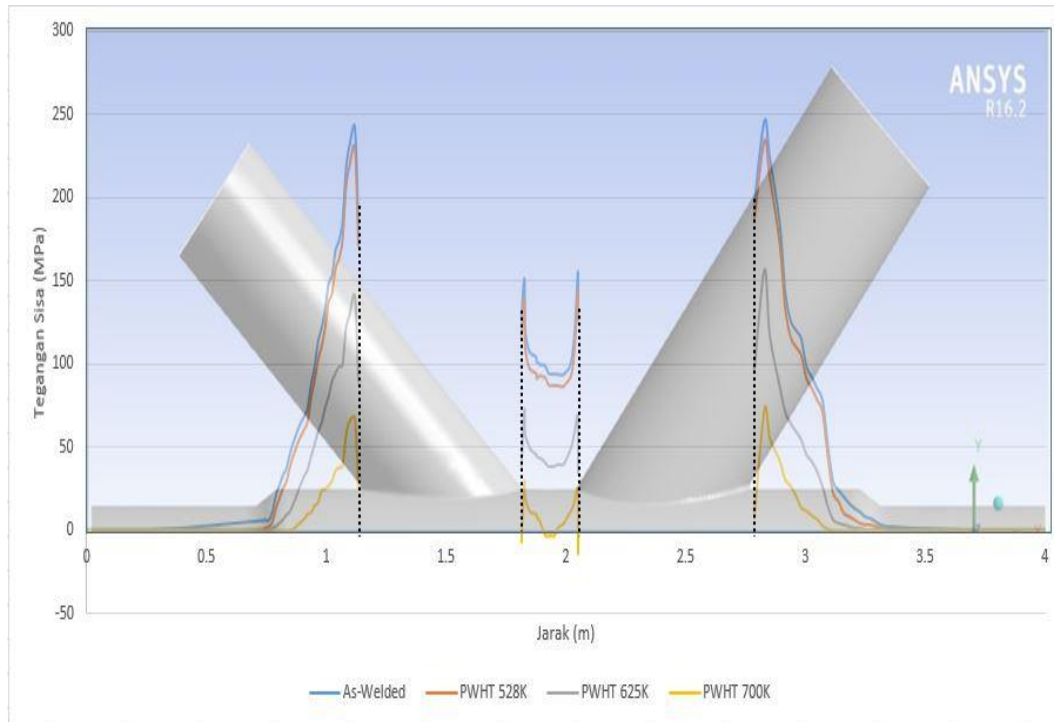
**Gambar 4. 31** Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT  
Loadcase 3 – Pathline 2

### 3. Loadcase 4



**Gambar 4. 32** Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT  
Loadcase 4 – Pathline 1





**Gambar 4. 33** Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT  
Loadcase 4 – Pathline 2

Dari Gambar 4.26-4.33 di atas terjadi penurunan yang cukup signifikan pada tegangan sisa maksimal. Hasil tegangan sisa maksimum pada masing-masing loadcase sebelum perlakuan PWHT pada sambungan tubular multiplanar tipe K adalah berturut-turut sebesar 347.21 MPa, 341.08 MPa, 326.9 MPa, dan 319.44 MPa. Kemudian setelah diberi perlakuan Post Weld Heat Treatment tegangan sisa maksimal tersebut mulai dari loadcase 1 - 4 berturut-turut turun menjadi 100.8 Mpa, 99.61 Mpa, 97.67 Mpa, dan 94.56 Mpa.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. KESIMPULAN**

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan nilai tegangan sisa dapat berkurang setelah diberi perlakuan PWHT. Berdasarkan analisis dan pembahasan yang dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil tegangan sisa maksimum pada masing-masing loadcase sebelum perlakuan PWHT pada sambungan tubular multiplanar tipe K adalah berturut-turut sebesar 347.21 MPa, 341.08 MPa, 326.9 MPa, dan 319.44 MPa. Sedangkan untuk distorsi yang terjadi sebesar 0,21 m, 0,23 m, 0,23, dan 0,24 m yang terletak diujung teratas brace sebelah kiri. Dari 4 (empat) loadcase simulasi urutan pengelasan, tegangan sisa maksimal terkecil terjadi pada loadcase ke-4 dengan urutan pengelasan simultan semua brace dilas secara bersamaan.
2. Setelah diberi perlakuan PWHT tegangan sisa terus turun seiring dengan kenaikan suhu. Pengurangan tegangan sisa maksimal terbesar terjadi pada loadcase 1 sebesar 246.41 MPa dari tegangan sisa sebelum PWHT. Sedangkan pengurangan tegangan sisa maksimal terkecil pada loadcase 4 dengan penurunan sebesar 224.88 MPa. Dari semua perlakuan *Post Weld Heat Treatment* maka semakin tinggi suhu PWHT pengurangan tegangan sisa maksimal akan semakin besar.

#### **5.2. SARAN**

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Disarankan untuk menambahkan beban aksial dalam perhitungan pada sambungan tubular untuk mengetahui pengaruhnya terhadap tegangan sisa.
2. Menambah variasi suhu PWHT untuk mengetahui efek penambahan suhu PWHT pada perubahan tegangan sisa



3. Disarankan untuk menambah variasi urutan pengelasan untuk masing-masing brace.
4. Dianjurkan untuk menganalisa pengaruh tegangan sisa terhadap umur kelelahan dari sambungan.

## DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS. 2010. "ANSYS Manual". Release 12, ANSYS Inc.
- ANSYS. 2013. "ANSYS Mechanical APDL Element Reference" Release 15, ANSYS Inc.
- ANSYS. 2013. "ANSYS Mechanical APDL Theory Reference" Release 15, ANSYS Inc.
- Aprilia, A. 2016. "Analisa Tegangan Sisa dan Distorsi Pada Sambungan Tubular Tipe T dengan Pengaruh *Post Weld Heat Treatment* Menggunakan Metode Elemen Hingga". Tugas Akhir ITS
- Arifin, A. 2012. "Pengaruh Preheat Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Sambungan Las GTAW Material Baja Paduan 12Cr1MoV yang Digunakan pada Superheater Boiler". Seminar Nasional Pascasarjana XII.
- AWS. 2000. "Structural Welding Code – Steel". 17<sup>th</sup> edition.
- Bang, I.W., Son, Y.P., Kim, Y.P., Kim, W.S., 2002. "Numerical Simulation of Sleeve Repairs Welding In-Service Gas Pipelines". Welding Journal.
- Bate, S.K., Green, D. 1997. "A Review of Residual Stress Distributions in Welded Joints for the Defect Assesment of Offshore Structure". Oxfordshire OX14 3DB.
- Chen, Zheng. 2015. "Influence of welding sequence on welding deforation and residual stress of a stiffened plate structure". Journal of Ocean Engineering – Elsevier
- Conrardy, C., Huang, T.D., Harwig, D., Dong, P., Kvidahl, L., Evans, N., Treaster, A., 2006. Practical welding techniques to minimize distortion in lightweight ship structures. J. Ship Prod. 22 (4), 239–247.
- Deng, Dean., Murakawa,Hidekazu. 2008. "Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint. Journal of computation materials science.
- Deng, D., Murakawa, H., Liang, W., 2007. "Numerical simulation of welding distortion in large structures". Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 196, 4613–4627
- Dong, Pingsha., Song, Shaopin., Zhang, Jinmiao. 2013. "Analysis of Residual Stres Relief Mechanisms in Post Weld Heat Treatment". International Journal of Pressure Vessels and Piping – Elsevier.

- Fu, G., Lourenco, M., Duan, M., Estefen, S., 2014. "Effect of Boundary Conditions on Residual Stress and Distortion in T-Joint Welds". *Journal of Construction Steel Research*.
- Gannon, L., Liu, Y., Pegg, N., Malcolm, J.S., 2012. Effect of welding-induced residual stress and distortion on ship hull girder ultimate strength. *Mar. Struct.* 28, 25–49.
- Jang, G.C., Chang, K.H., Lee, C.H. 2007. "Characteristic of The Residual Stress Distribution in Welded Tubular T-joints". *Journal of Mechanical Science and Technology*.
- Rodrigues, Telmo Viana. 2010. "Modelling Post Weld Heat Treatment For Residual Stress Relieving In Welded Steel Plates Using The Finite Element Method". VI National Congress Of Mechanical Engineering.
- Saputra, B.Y. 2012. "Prediksi Tegangan Sisa pada Pengelasan Beda Logam (Dissimilar Metal) dengan Menggunakan Analisa Metode Elemen Hingga". Skripsi Universitas Indonesia.
- Setyo, D.N. 2016. "Analisa Tegangan Sisa dan Distorsi Sebelum dan Sesudah PWHT pada Sambungan Tubular Tipe K dengan Metode Elemen Hingga". Tugas Akhir ITS
- Total E&P Indonesia. 2011. "Post Weld Heat Treatment Procedure". Tatun Well Connection Package 3B Contract.
- Wiryosumarto H, Okumura T. 1994. "Teknologi Pengelasan Logam=Welding Engineering". Jakarta : Pradnya Paramita.
- Zacharia, T., Vitek, J.M., Goldak, J.A., Debroy, T.A., Rappaz, M., Bhadeshia, H.K.D.H. 1995. "Modeling The Fundamental Phenomena in Welds" *Modeling Simulation Material Science Engineering*. Vol.3.



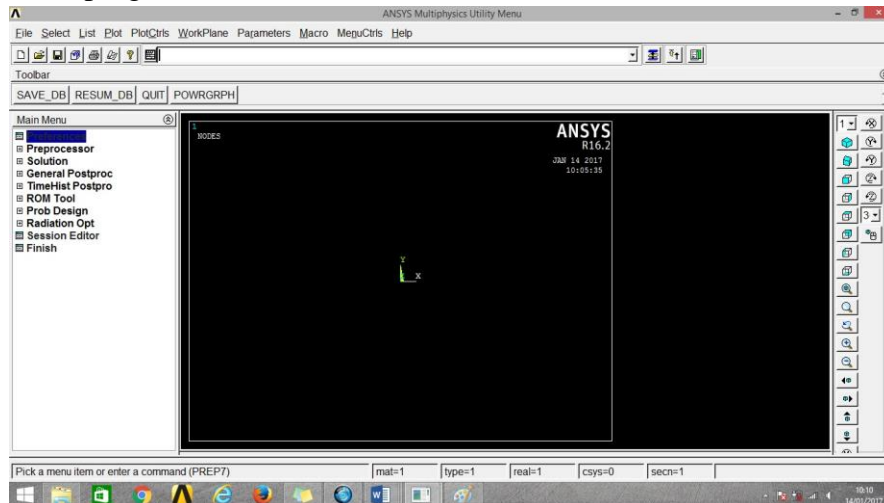
## **LAMPIRAN A**

### **PROSES Pengerjaan Analisa Thermal dengan *Software* ANSYS APDL 16.2 Mechanical**

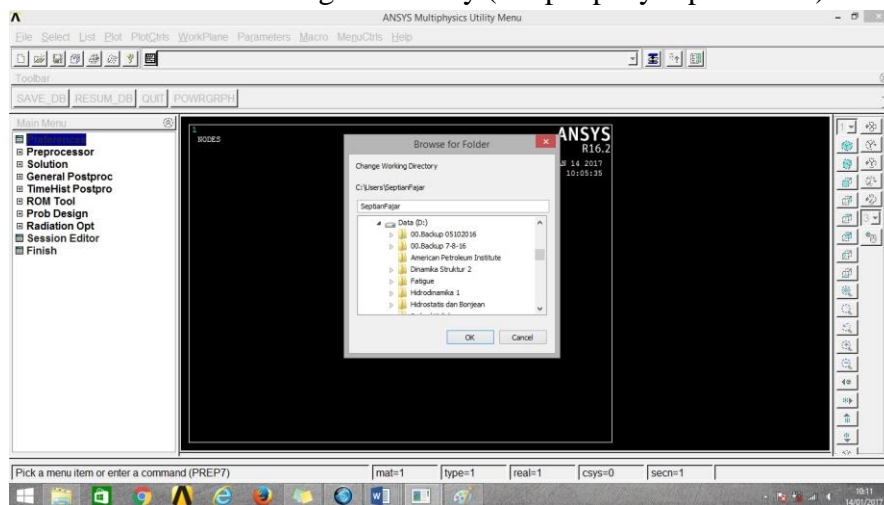
## LAMPIRAN A

### PROSES Pengerjaan ANALISA THERMAL

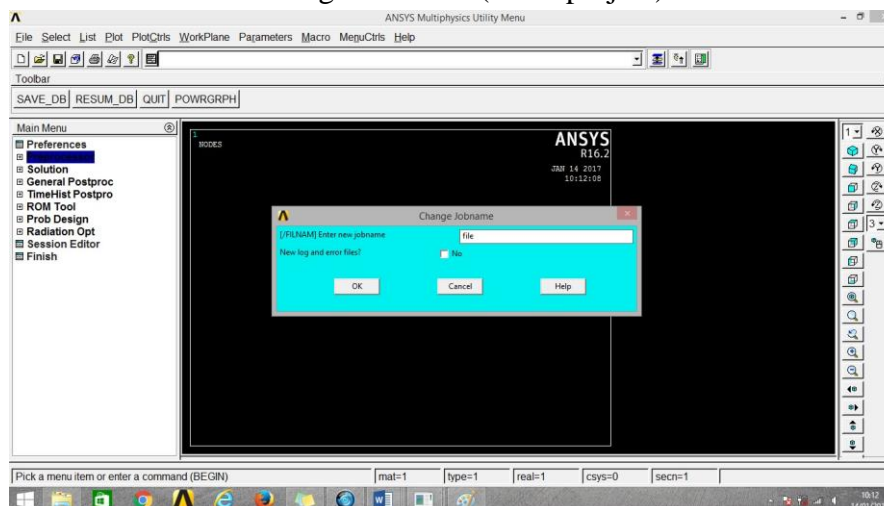
#### 1. Buka program ANSYS APDL 16.2 mechanical



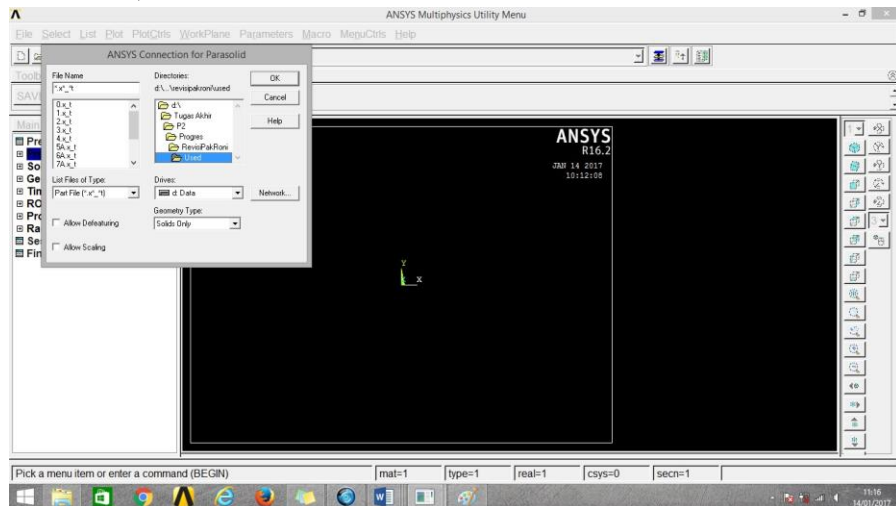
#### 2. Buka File → Pilih Change Directory (tempat penyimpanan file)



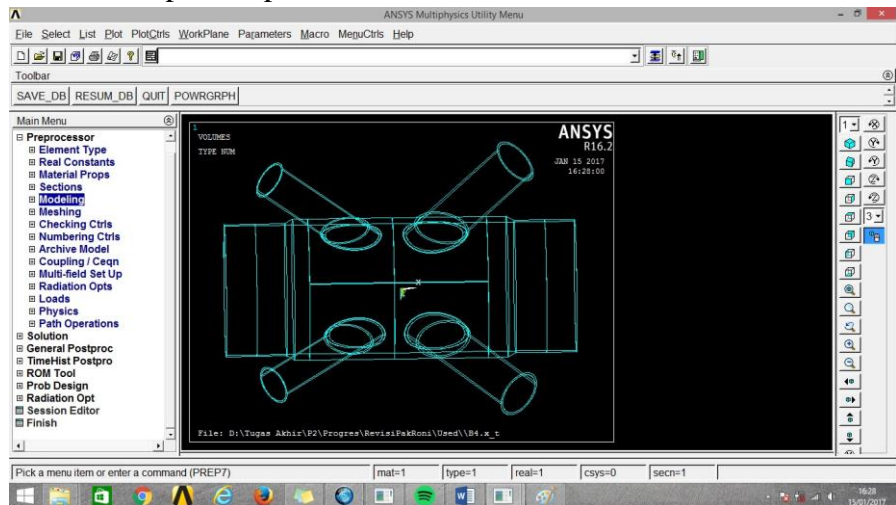
#### 3. Buka File → Pilih Change Jobname (nama project)



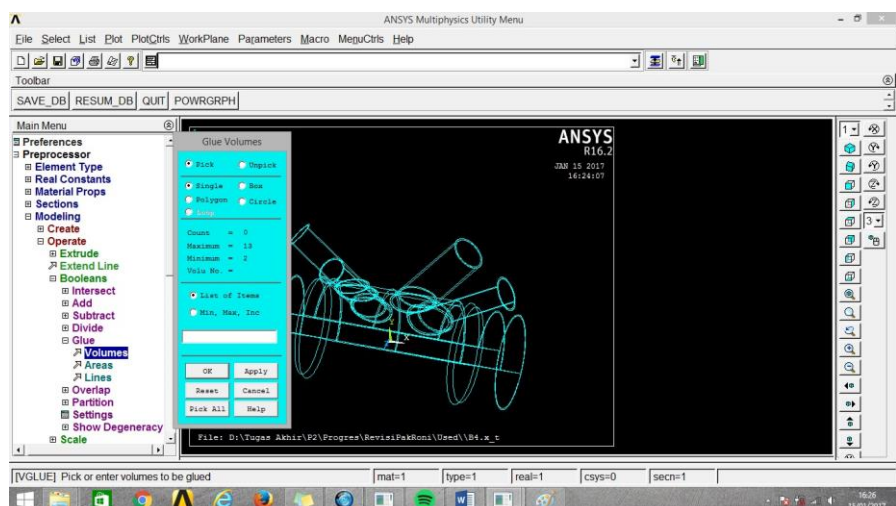
- Buka File → Import → PARA (browse file parasolid dari hasil solidwork)



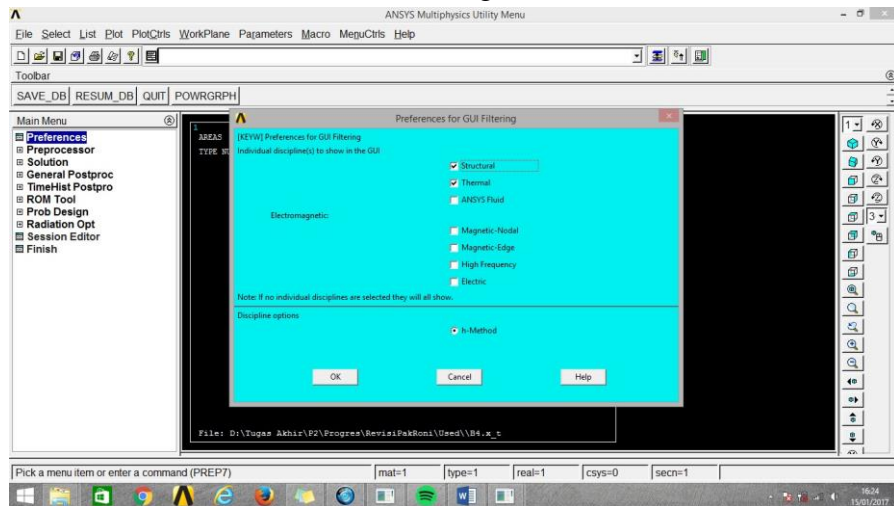
- Muncul tampilan seperti di bawah ini



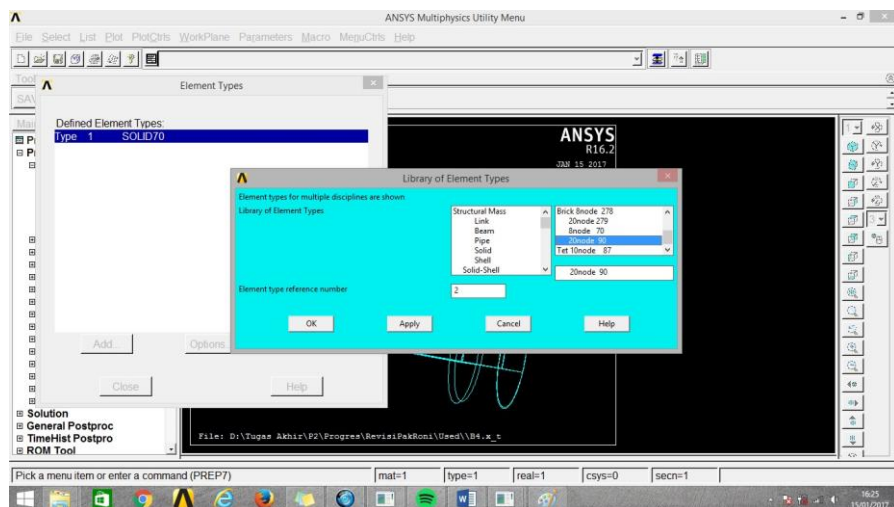
- Kemudian setelah beberapa dimasukkan gabungan dengan cara pilih Processor → Modeling → Operate → Booleans → Glue → Volume → klik Pick All



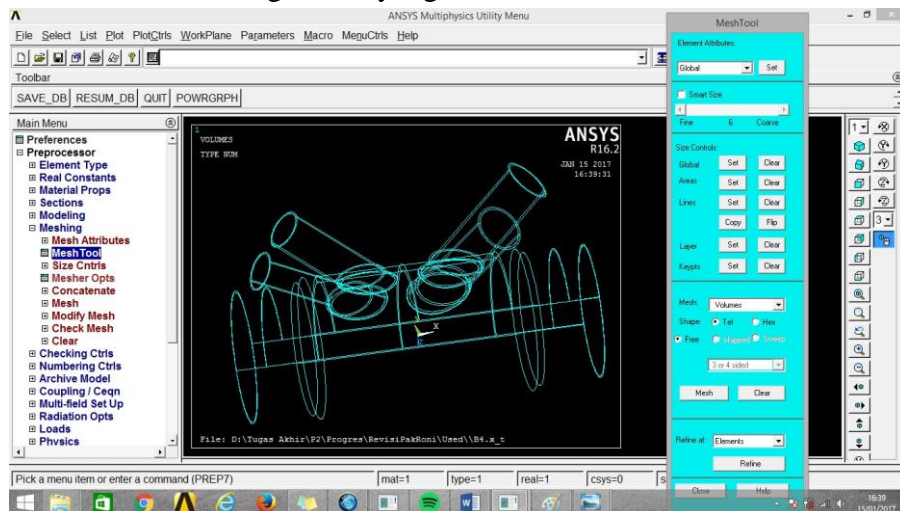
7. Main menu → Preference → Centang Structural dan Thermal → OK



8. Main menu → Preprocessor → Element Type → pilih Add/Edit/Delete → Add → pilih Thermal Mass → Solid → pilih “8 Node 70 dan 20 Node 90” → OK

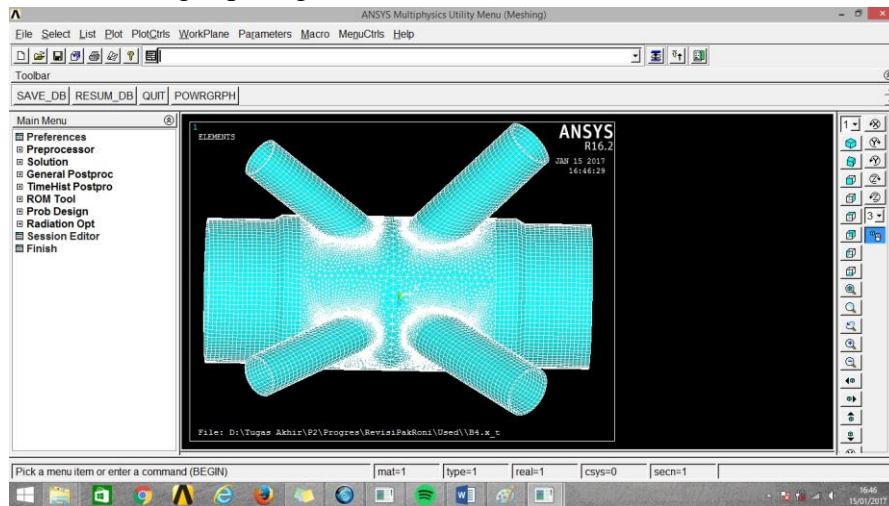


9. **Meshing** : Main menu → Preprocessor → Meshing → Mesh Tool → Pilih ukuran meshing sesuai yang diminta

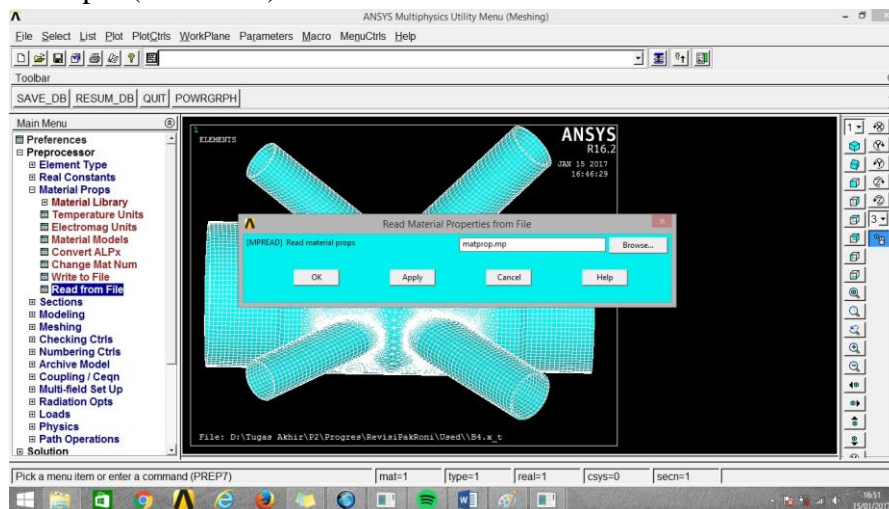




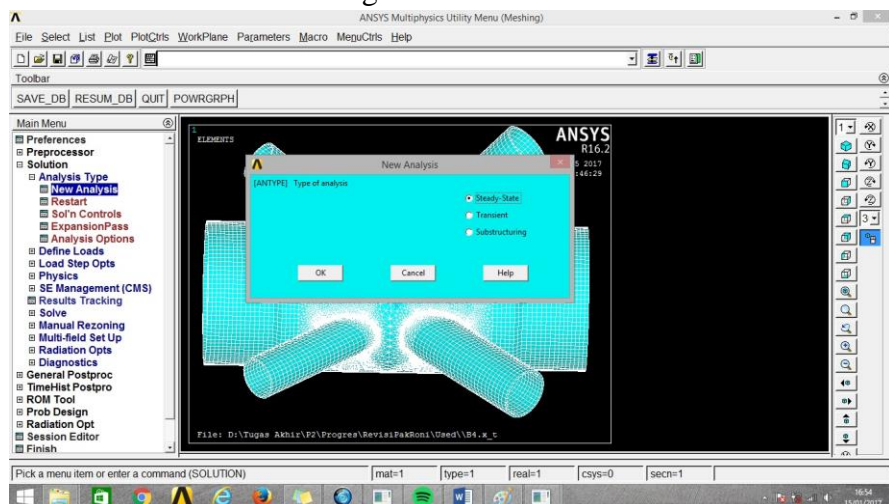
10. Hasil meshing seperti gambar di bawah ini



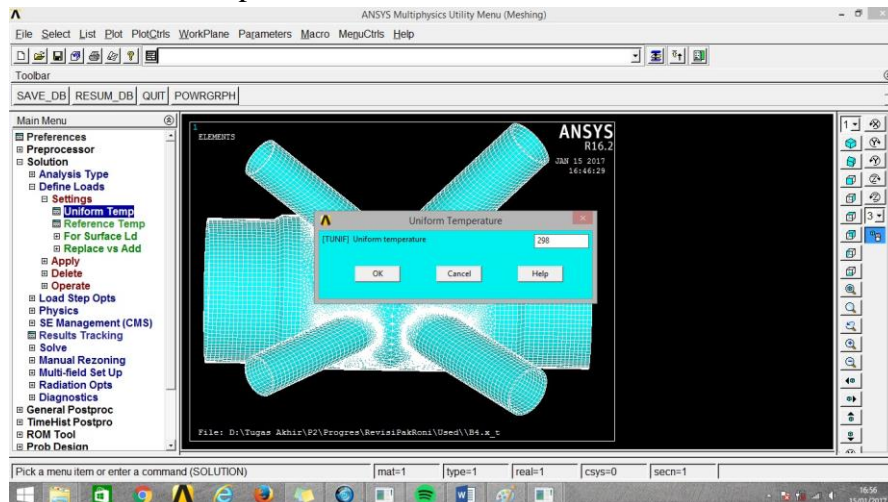
11. Main menu → Preprocessor → Material Prop → pilih Read from File → klik browse → pilih material properties (format mp) dan bilinear isotropic (format txt)



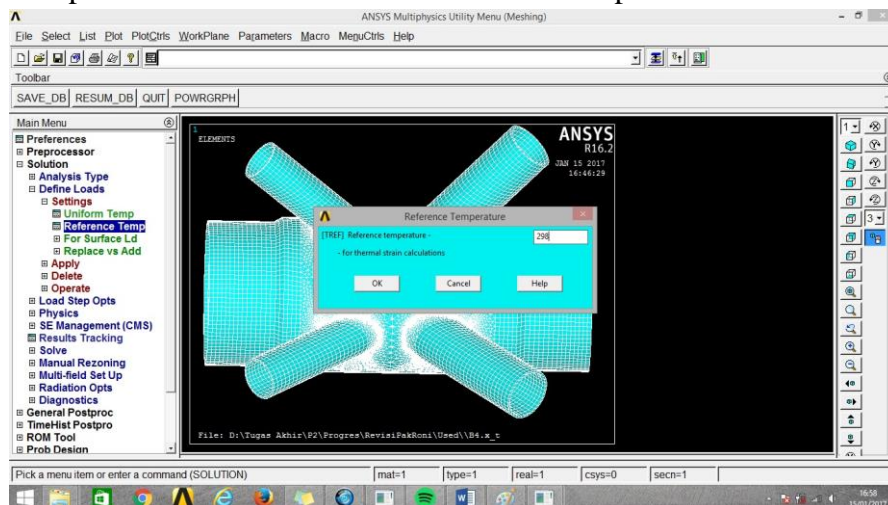
12. Main menu → Solution → Analysis Type → New Analysis → Transient → OK → Centang Full → OK



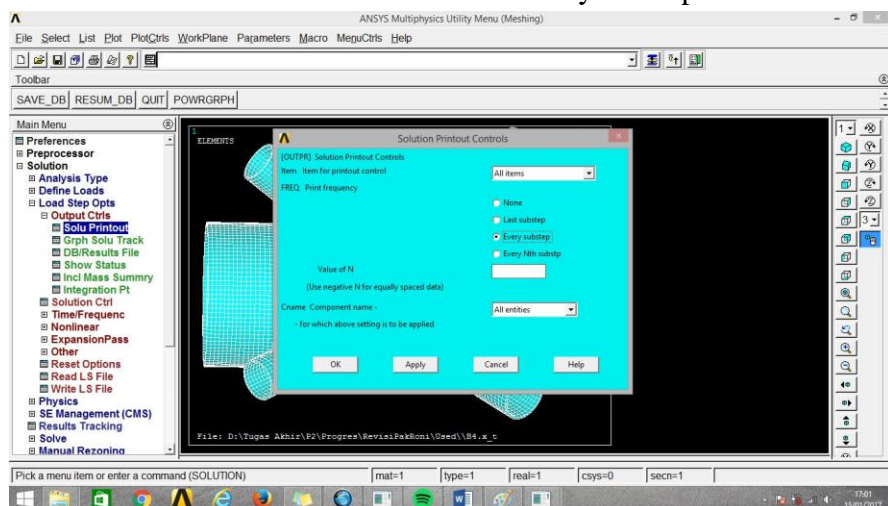
13. Main menu → Solution → Define Loads → Setting → Uniform Temp  
→ Masukkan temperatur → OK



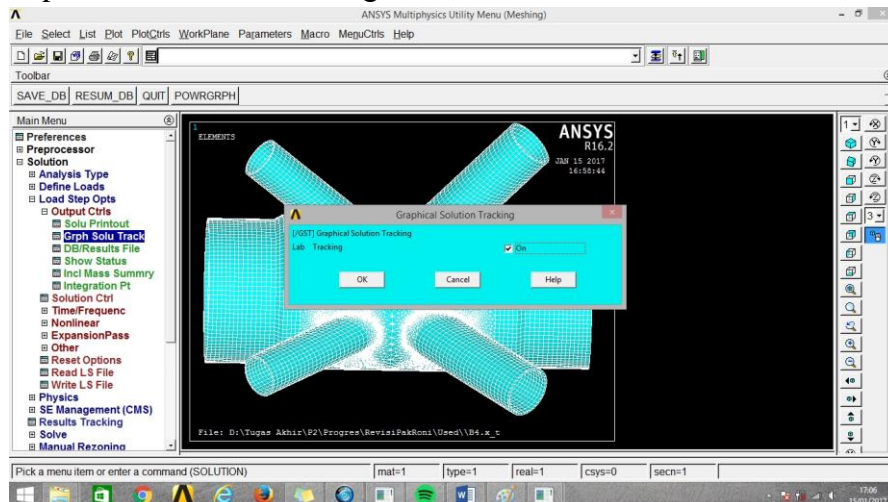
14. Main menu → Solution → Define Loads → Setting → Reference Temp  
→ Masukkan reference temperature → OK



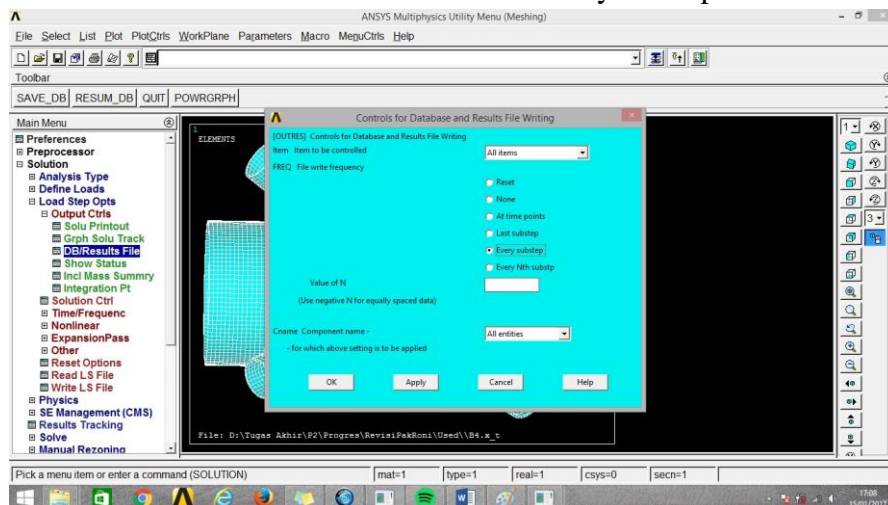
15. Main menu → Solution → Load Step Opts → Output Ctrl → Klik Solu Print Out → Pilih all item → Pilih every substep → OK



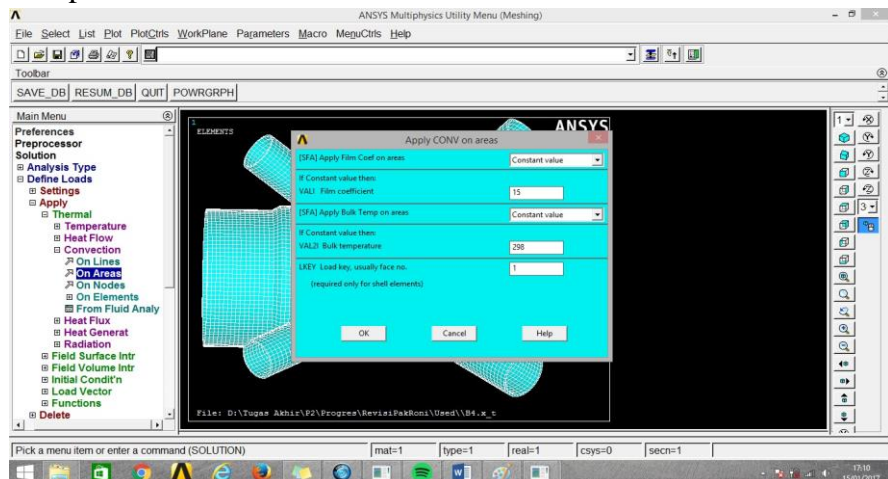
16. Main menu → Solution → Load Step Opts → Pilih Output Ctrl → Grph Solu Track → Centang 'ON' → OK



17. Main menu → Solution → Load Step Opts → Output Ctrl → DB/Result File → Pilih All Item → Pilih every substep → OK

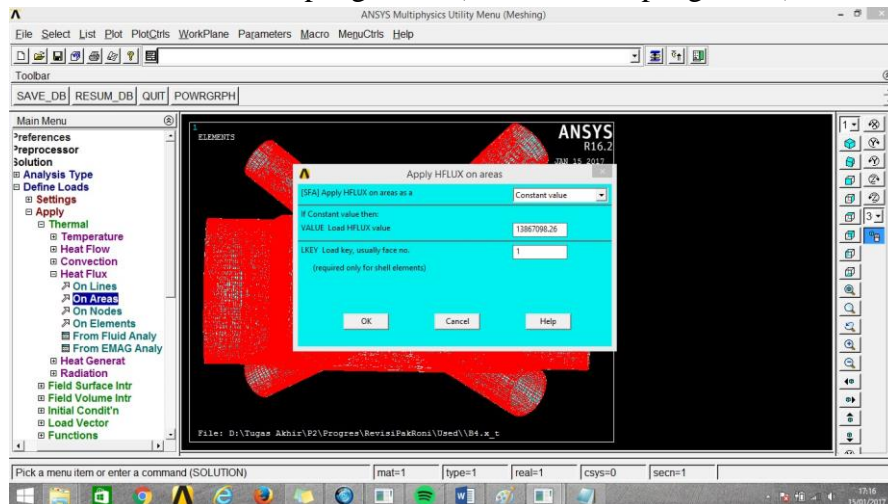


18. Main menu → Solution → Define Loads → Apply → Thermal → Convection → On Area → Pick All → Film Coefficient = 15 → Bulk Temperature = 298 → OK





19. Main menu → Solution → Define Loads → Apply → Heat Flux → On Area → Pilih Area pengelasan (sesuai urutan pengelasan) → OK



20. Main menu → Solution → Load Step Opts → Time/Freq → Time and Substeps → Isi sesuai dengan perhitungan waktu las dan urutan loadstep

Time : Waktu pengelasan (detik)

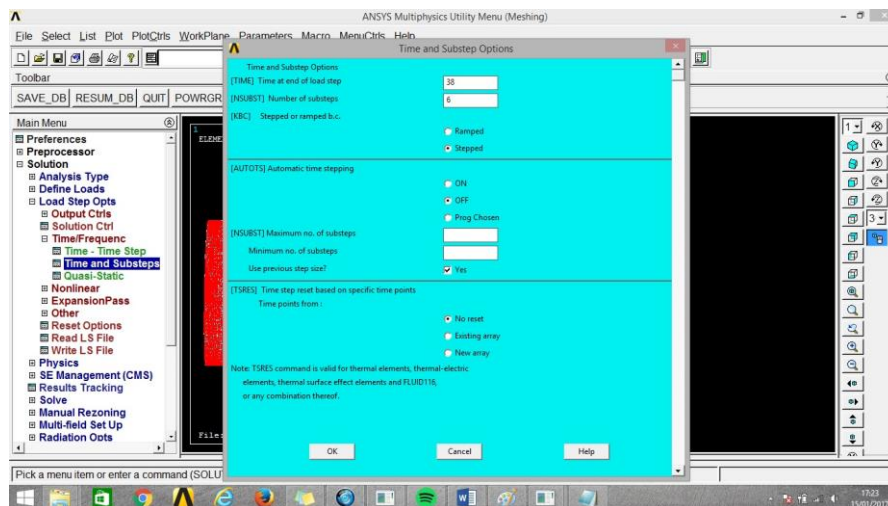
NSUBST : Nomor substep

KBC : Centang STEPPED

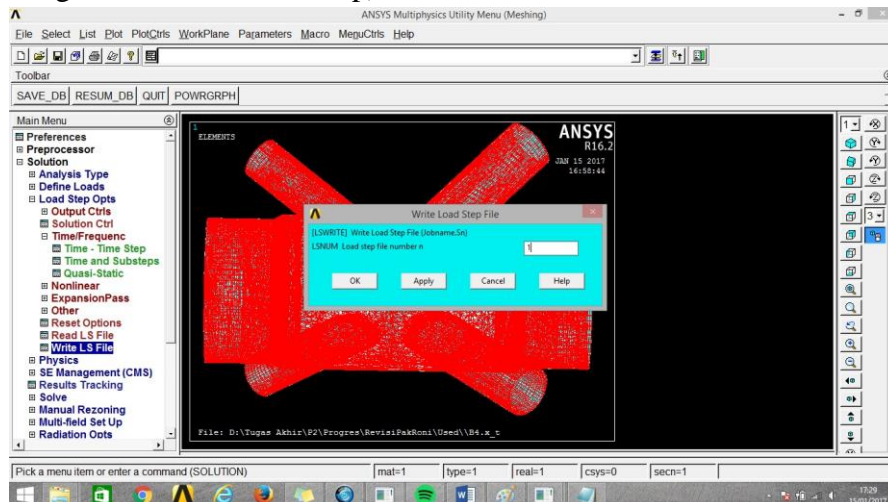
AUTOTS : OFF

TSRES : NO RESET

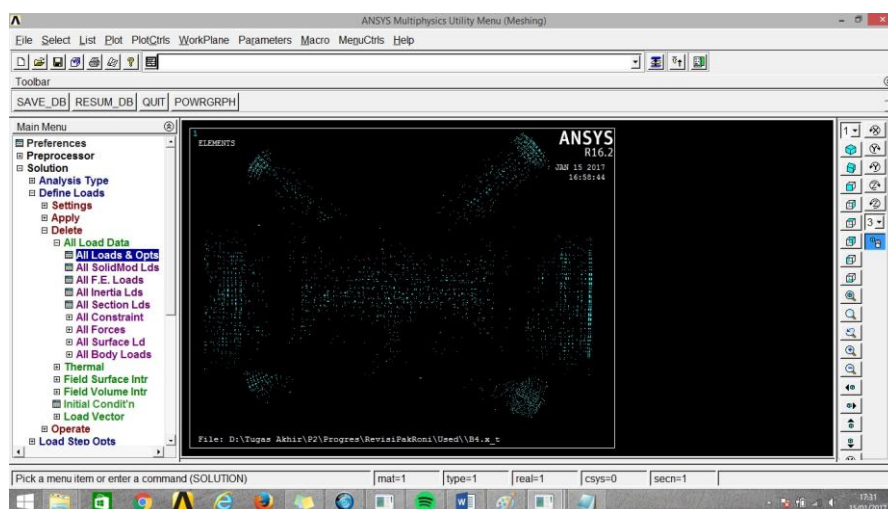
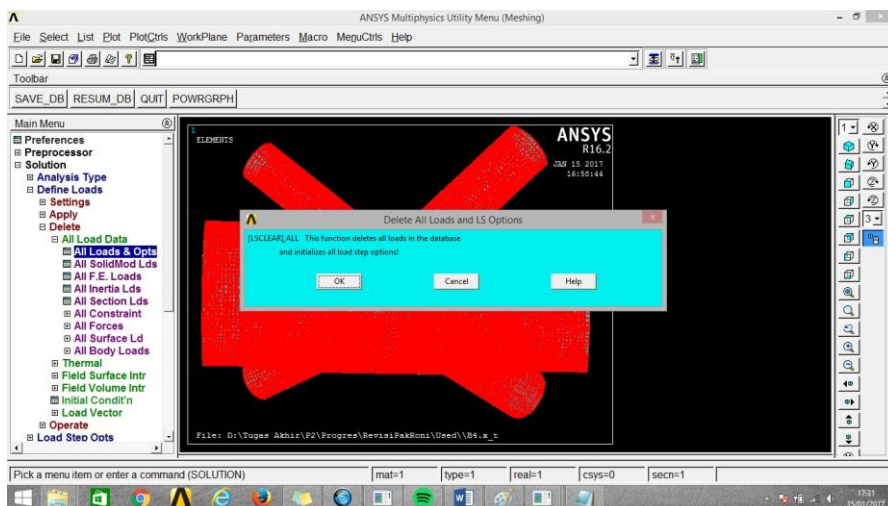
Klik OK



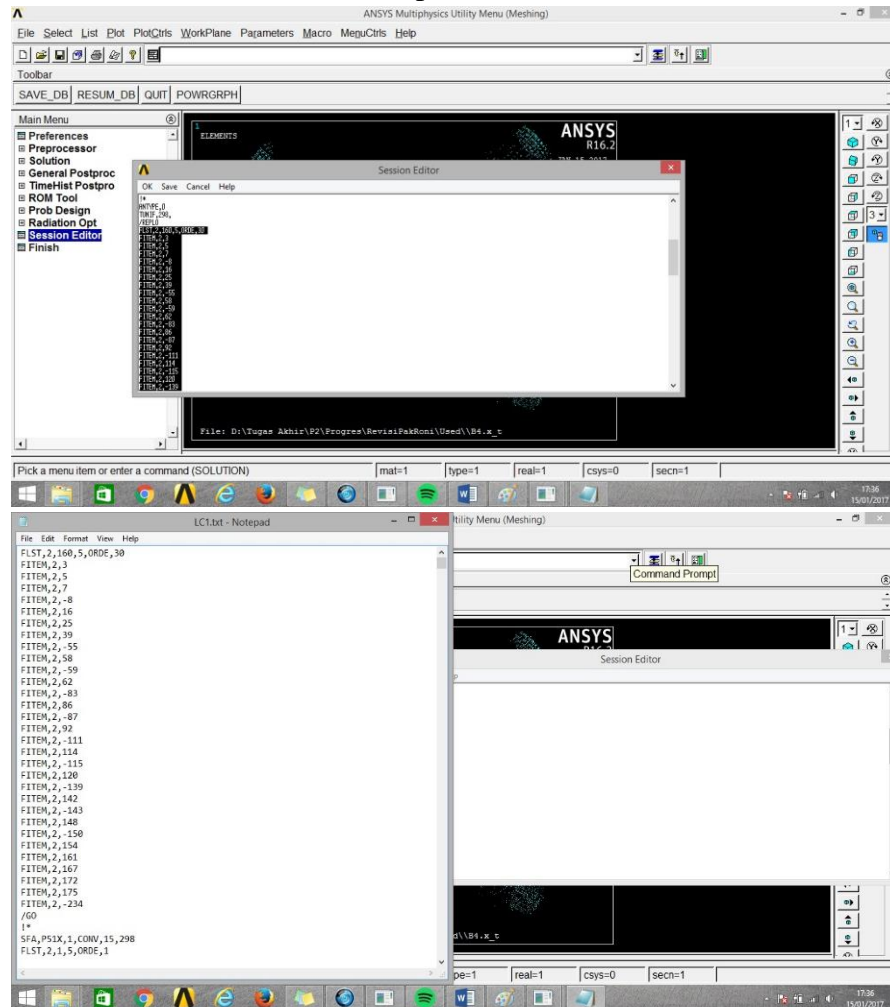
21. Main menu → Solution → Load Step Opts → Write LS File (sesuai dengan nomor urut loadstep)



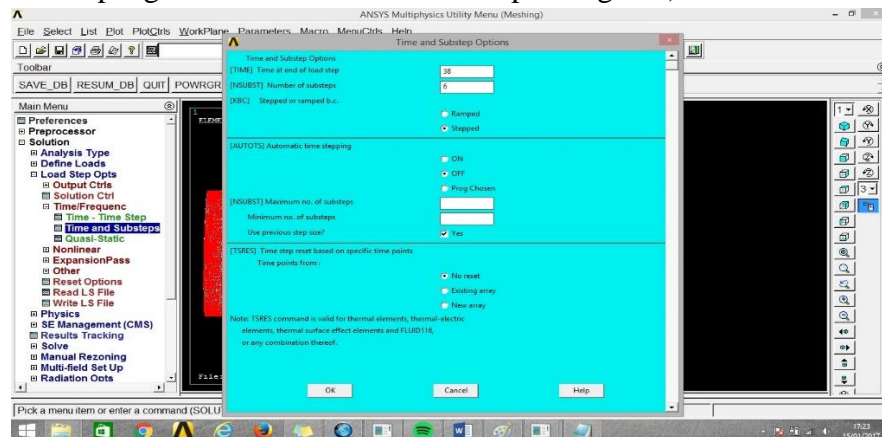
22. Main menu Solution Define Loads → Delete → All Loads & Data → All Loads and Opts



23. Ulangi langkah nomor 18 sampai dengan 22 untuk semua area pengelasan (sesuai urutan pengelasan). Dalam hal ini bisa dipermudah dengan menggunakan perintah dari session editor. Pilih Main menu → Session editor → Copy loadstep pertama ke notepad → Ubah Area, Waktu, dan Nomor urut loadstep

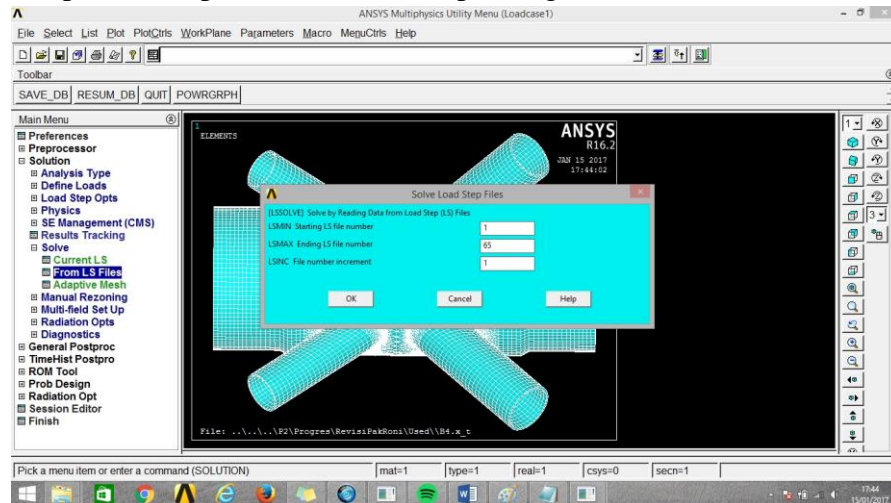


24. Untuk langkah pendinginan dilakukan seperti langkah nomor 20 dengan waktu pengelasan diisi total waktu selama pendinginan (total waktu pengelasan semua area + waktu pendinginan)



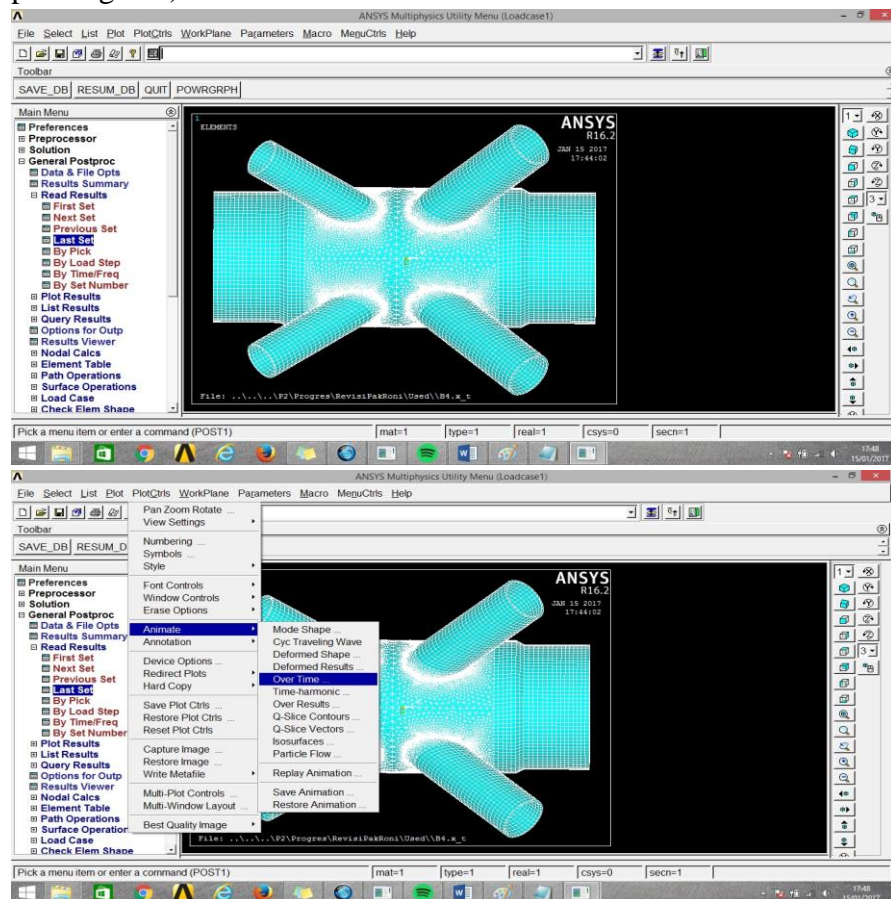
## 25. Solve

Main menu → Solution → Solve → From LS Write (isi mulai dari 1 sampai loadstep terakhir termasuk pendinginan)

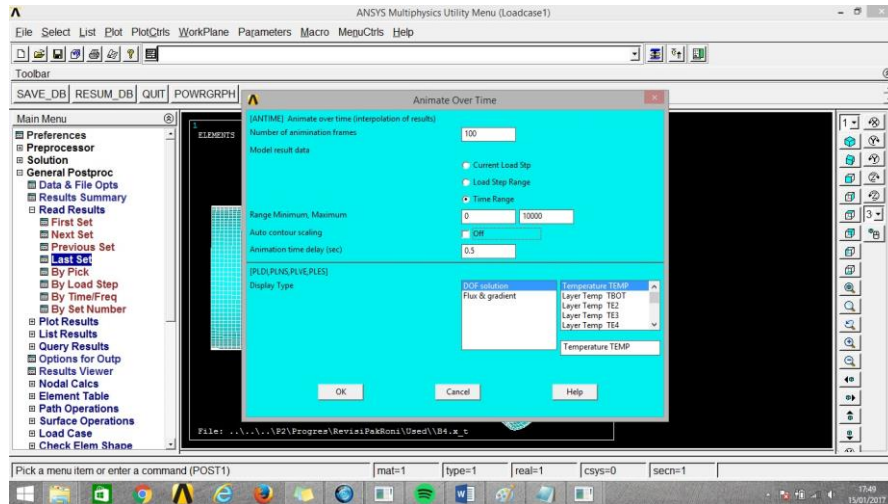


Tunggu sampai hasil running selesai, selama proses running akan muncul animasi pergerakan grafik berpotongan antara garis sumbu warna ungu dengan biru.

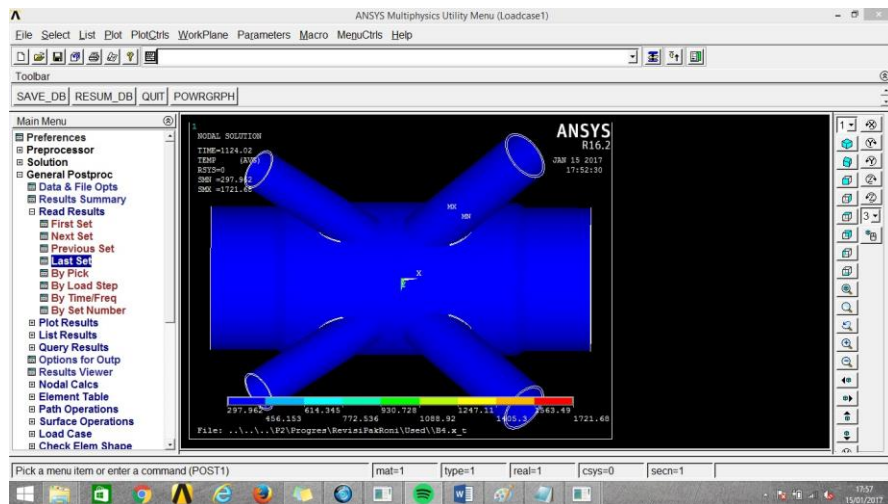
26. Main menu → General Postproc → Read Result → Last Set → Buka PlotCtrls → Animate → Over Time (pengaturan disesuaikan dengan pendinginan) → OK







27. Selanjutnya akan muncul animasi pengelasan seperti gambar di bawah ini





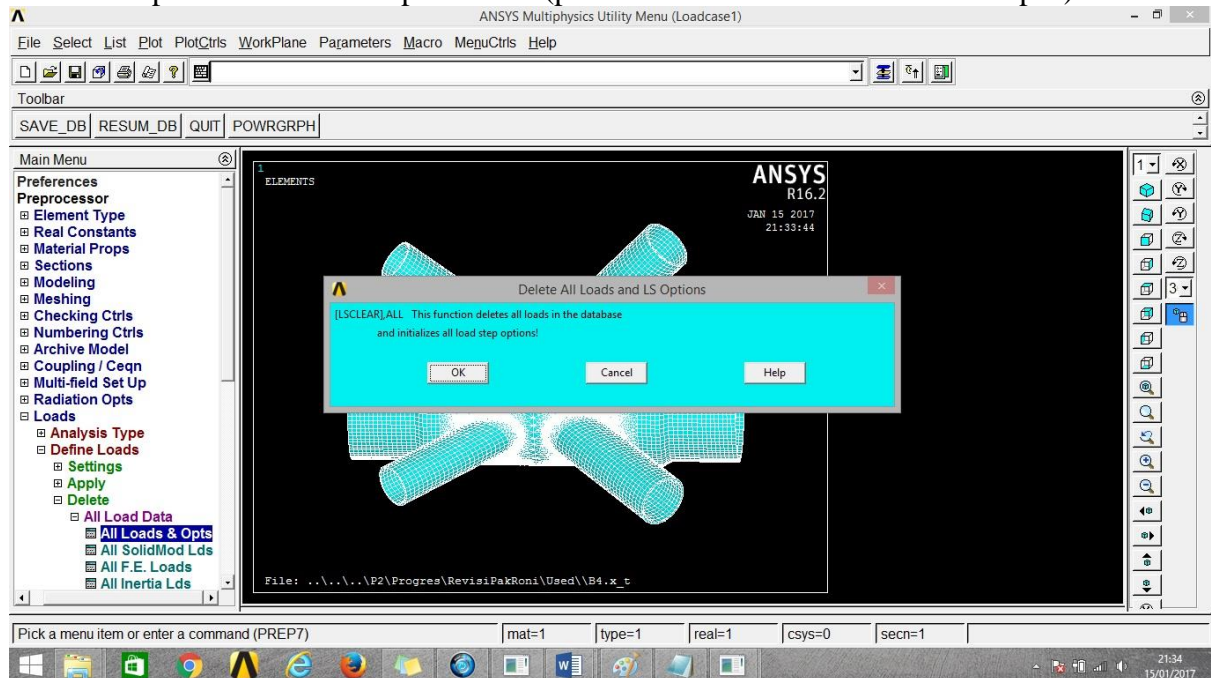
## **LAMPIRAN B**

### **PROSES Pengerjaan Analisa Structural Dengan *SOFTWARE* ANSYS APDL 16.2 MECHANICAL**

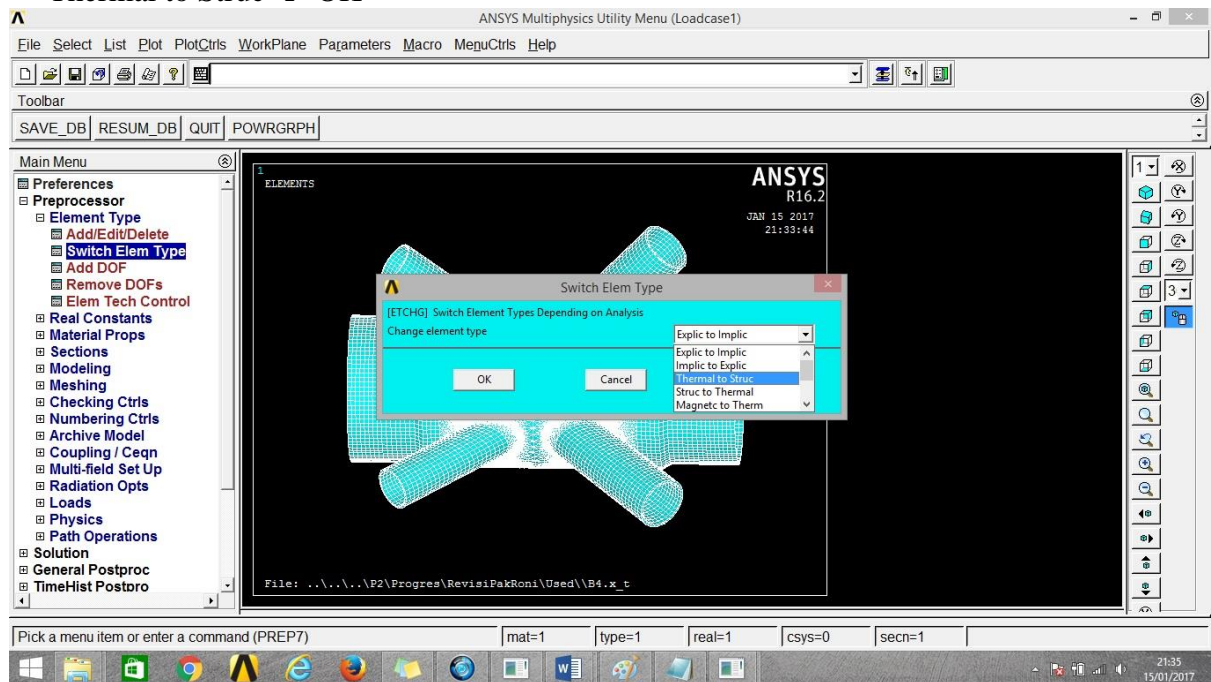
## LAMPIRAN B

### PROSES MENGUBAH REGANGAN THERMAL MENJADI REGANGAN STRUKTURAL YANG MENAKIBATKAN TERJADINYA TEGANGAN SISA

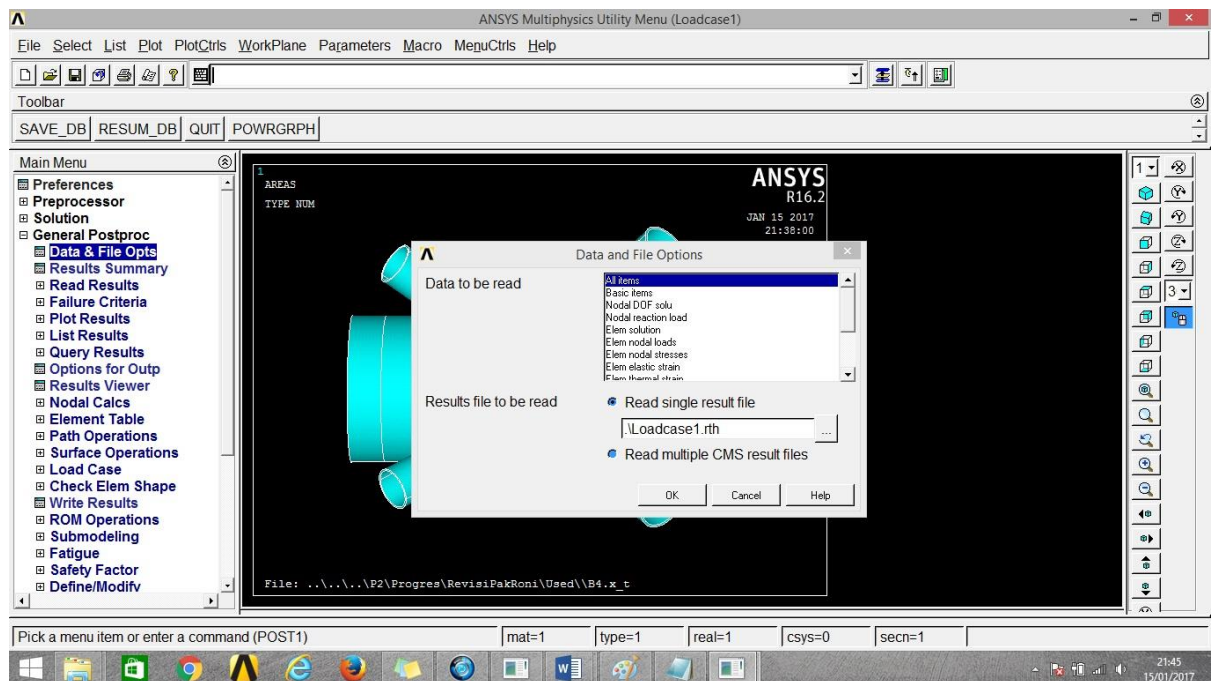
1. Main menu → pilih Preprocessor → Loads → Define Loads → Delete → All Load data → pilih All Loads & opts → OK (pastikan semua data Load telah dihapus)



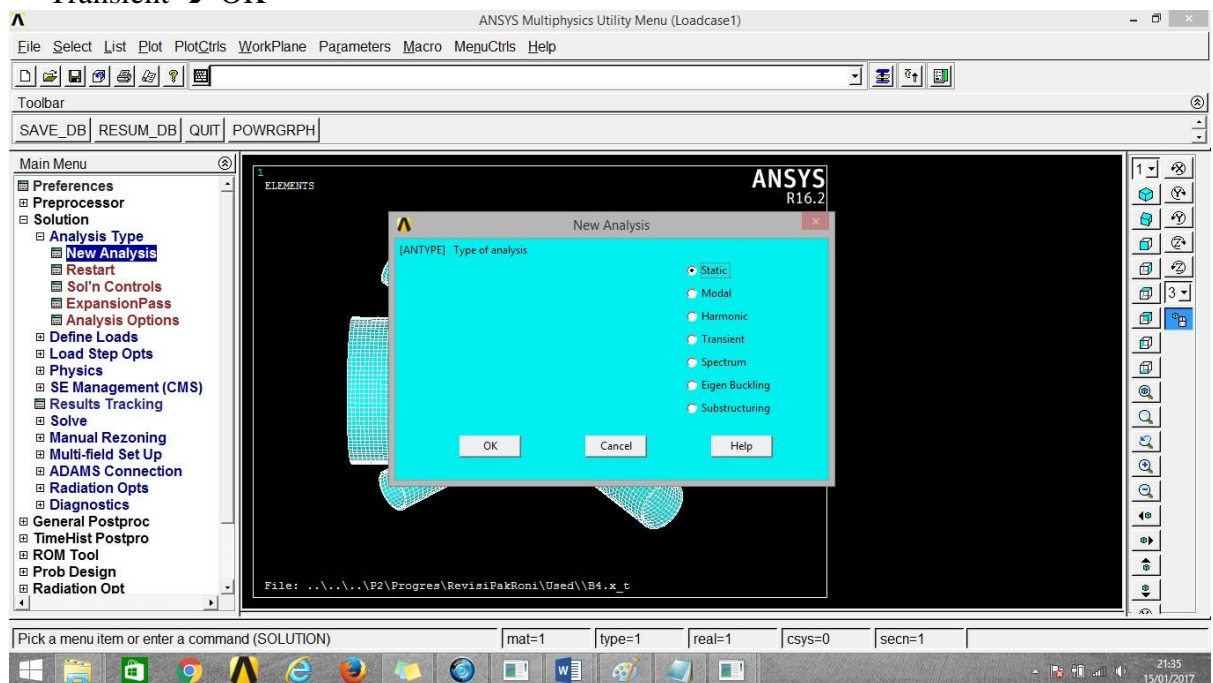
2. Main menu → pilih Preprocessor → Element Type → Switch Elem Type → pilih Thermal to Struc → OK



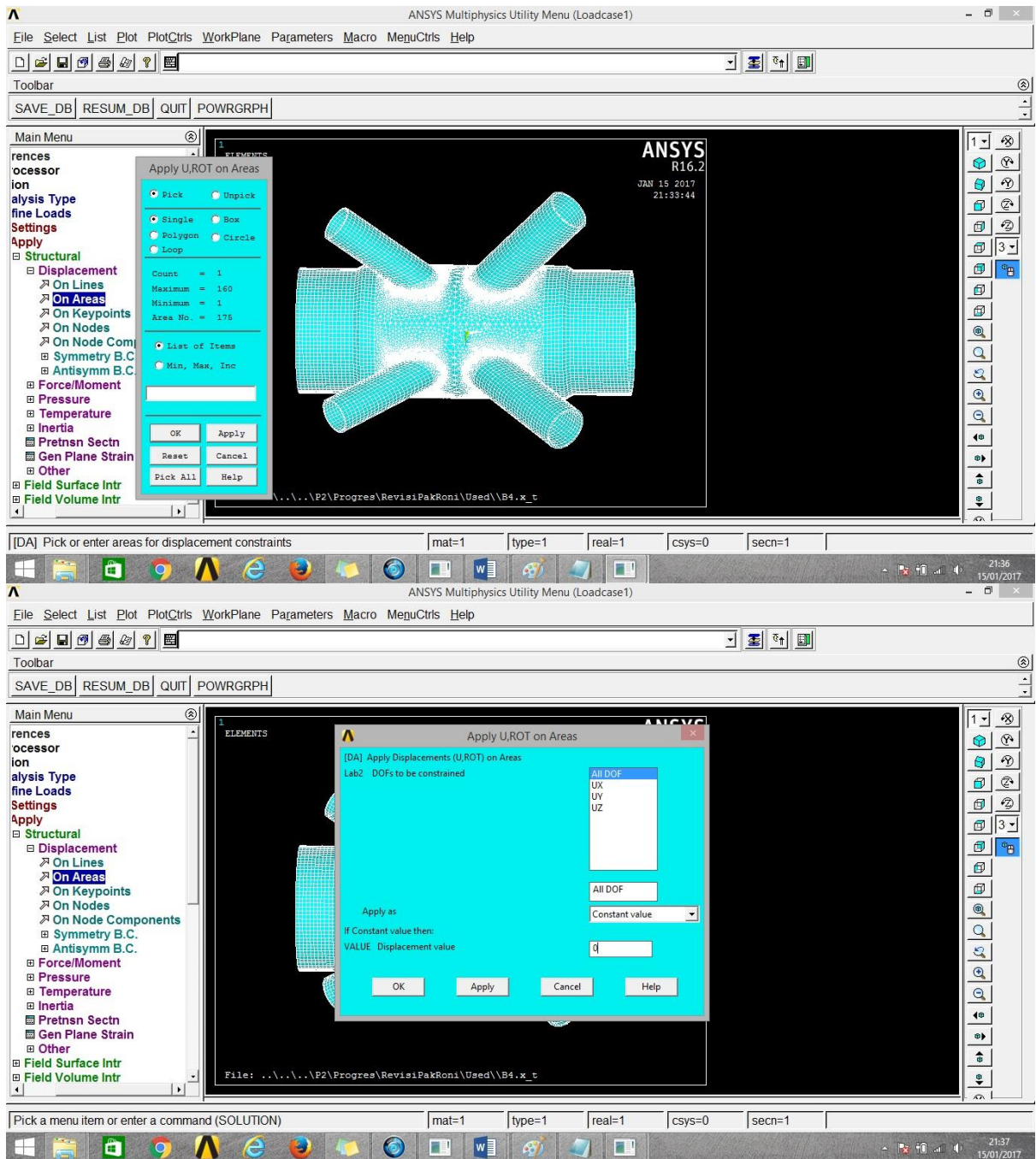
3. Main menu → pilih General Procproc → Data & File Ops → Browse → file rth → open → OK



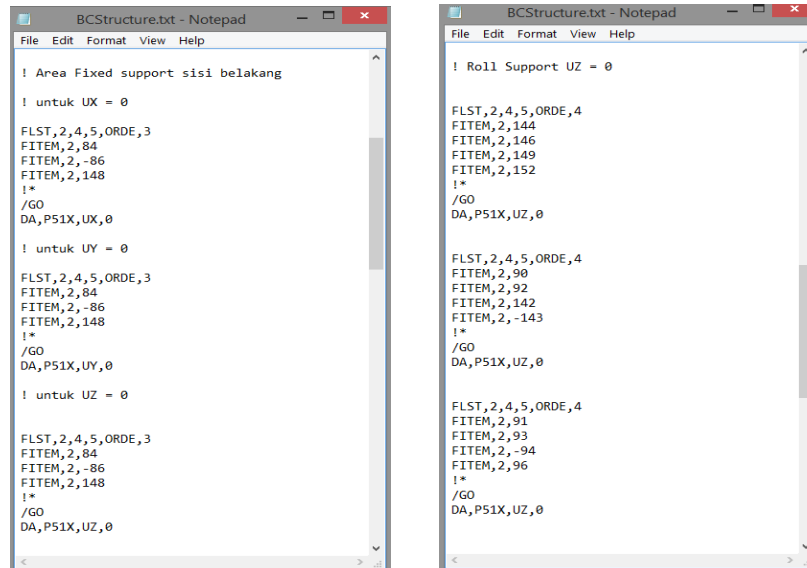
4. Main menu → pilih Solution → Analysis Type → New Analysis → pilih Static > Transient → OK



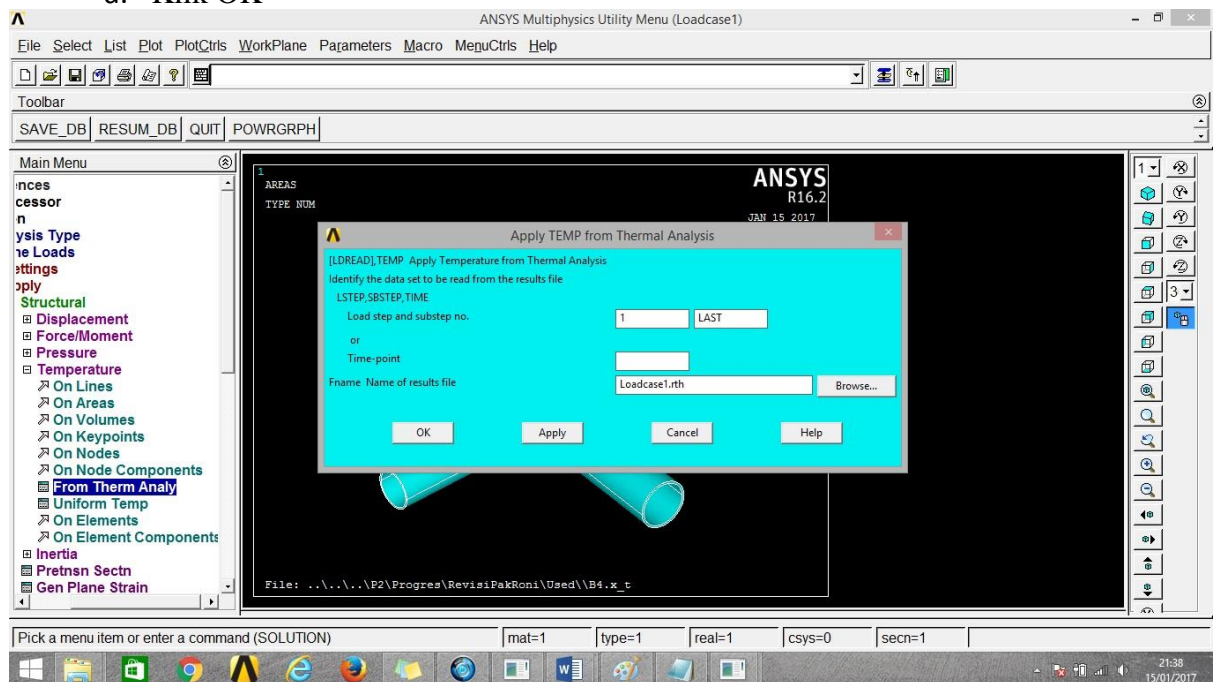
5. Main menu → Pilih Solution → Define Load → Apply → Structural → Displacement → On Area (pilih Boundary condition terhadap sumbu UX, UY dan UZ = 0)



6. Siapkan folder notepad baru untuk memudahkan pembuatan Boundary condition
  - Contoh folder notepad untuk Boundary condition untuk  $U_x$ ,  $U_y$  dan  $U_z = 0$

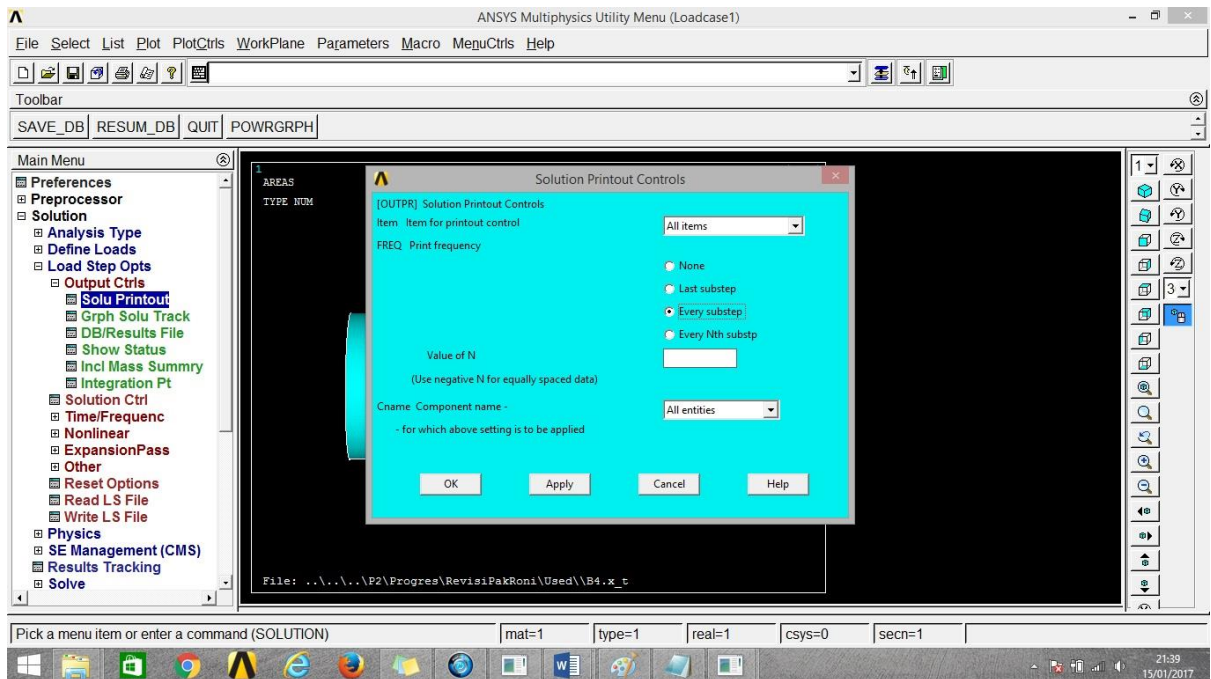


7. Main menu → Pilih Solution → Define Load → Apply → Structural → Temperature → pilih Form Therm Analy → masukkan data berikut :
  - a. Isi kolom dengan nomor urut loadstep
  - b. tuliskan “ LAST”
  - c. kemudian “browse file rth”
  - d. Klik OK

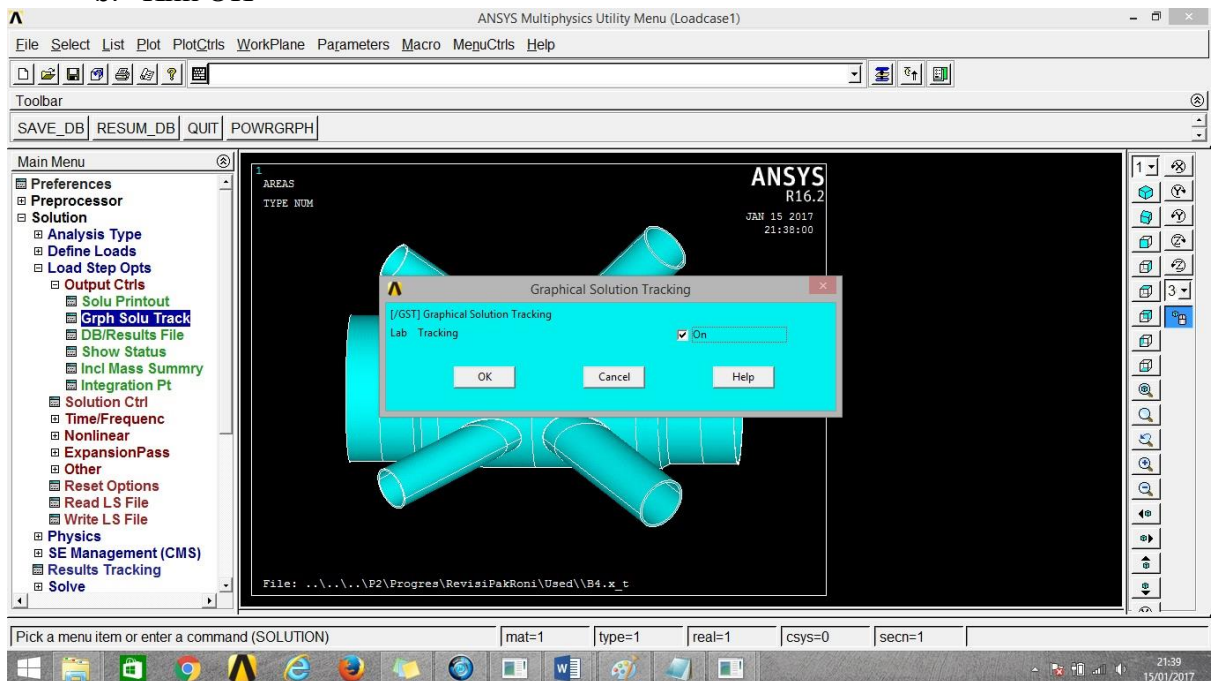


8. Main menu → Pilih Solution → Loadstep Opts → Output Ctrls → Pilih Solu Printout
  - a. Pada kolom OUTPR pilih All items
  - b. Check PREQ menjadi “Every substep”
  - c. Klik OK

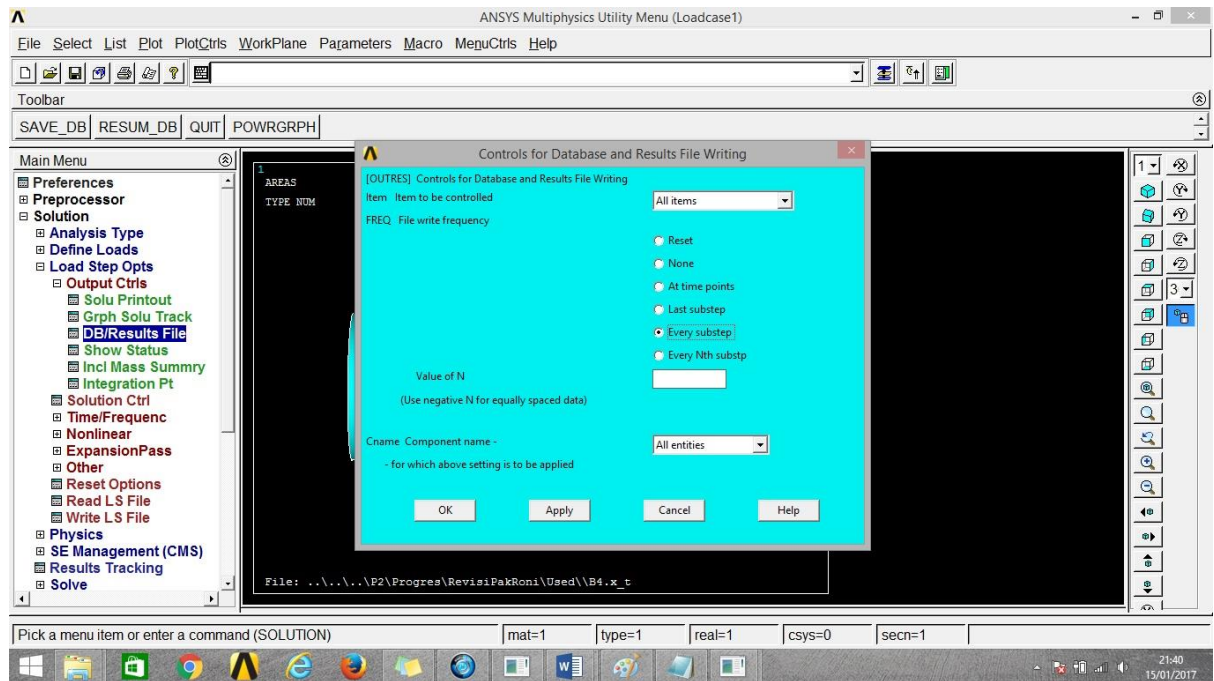




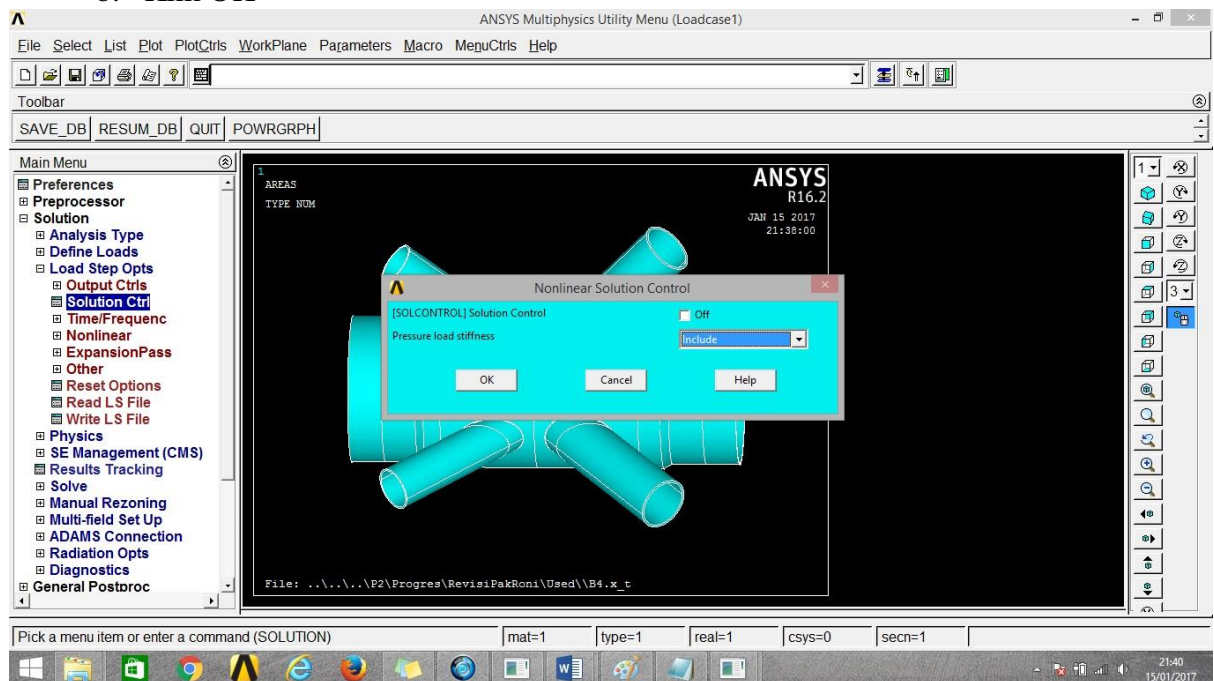
9. Main menu → Pilih Solution → Loadstep Opts → Output Ctrl → Grph Solu Track
  - a. Check point /GST pastikan menjadi “ON”
  - b. Klik OK



10. Main menu → Pilih Solution → Loadstep Opts → Output Ctrl → DB/Result File
  - a. Pilih item OUTRES menjadi “All item”
  - b. Check PREQ pada “Every substep”
  - c. Klik OK

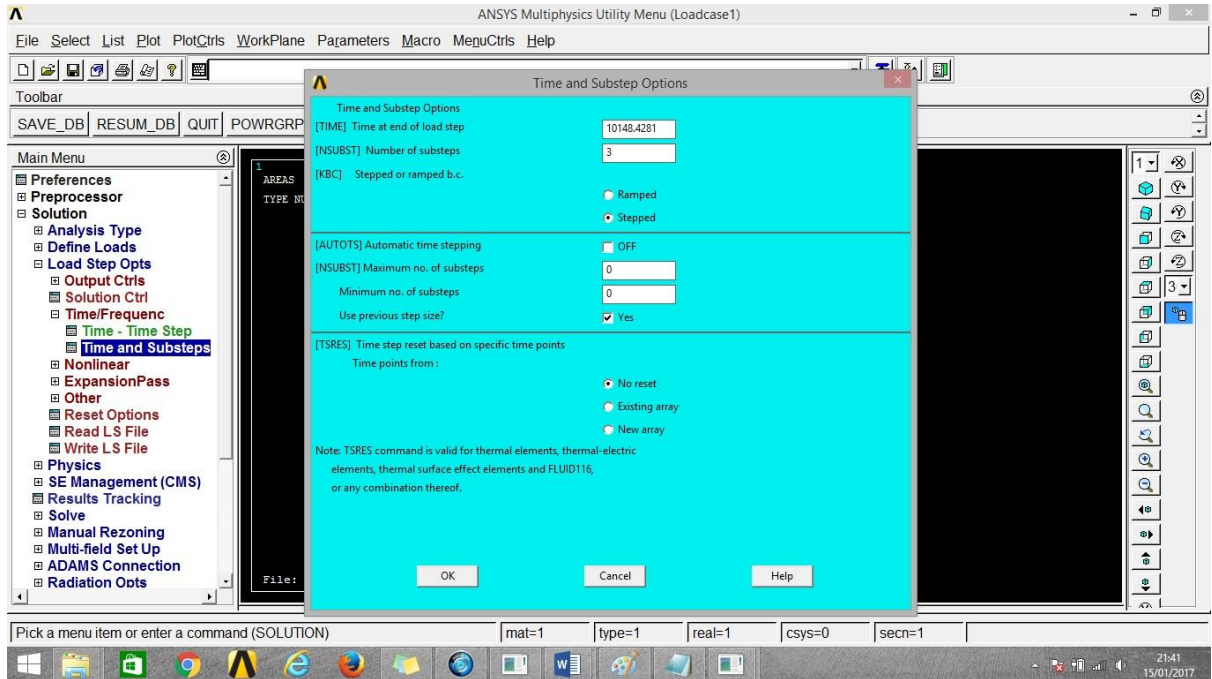


11. Main menu → Pilih Solution → Loadstep Opts → Solution Ctrl
  - a. Pilih “SOLCONTROL” pastikan menjadi “OFF”
  - b. Klik OK



12. Main menu → Pilih Solution → Loadstep Opts → Time/Frequenc → pilih Time and Substeps
  - a. Isi kolom “TIME” dengan jumlah waktu yang dibutuhkan untuk satu Loadstep ke Loadstep berikutnya (waktu dapat disesuaikan dengan jarak antar Loadstep)
  - b. Isi kolom “NSUBST (Number of substep)”
  - c. Check “Stepped”
  - d. Check “AUTOTS” pada kondisi “OFF”
  - e. Pastikan “TSRES” dalam kondisi “No reset”

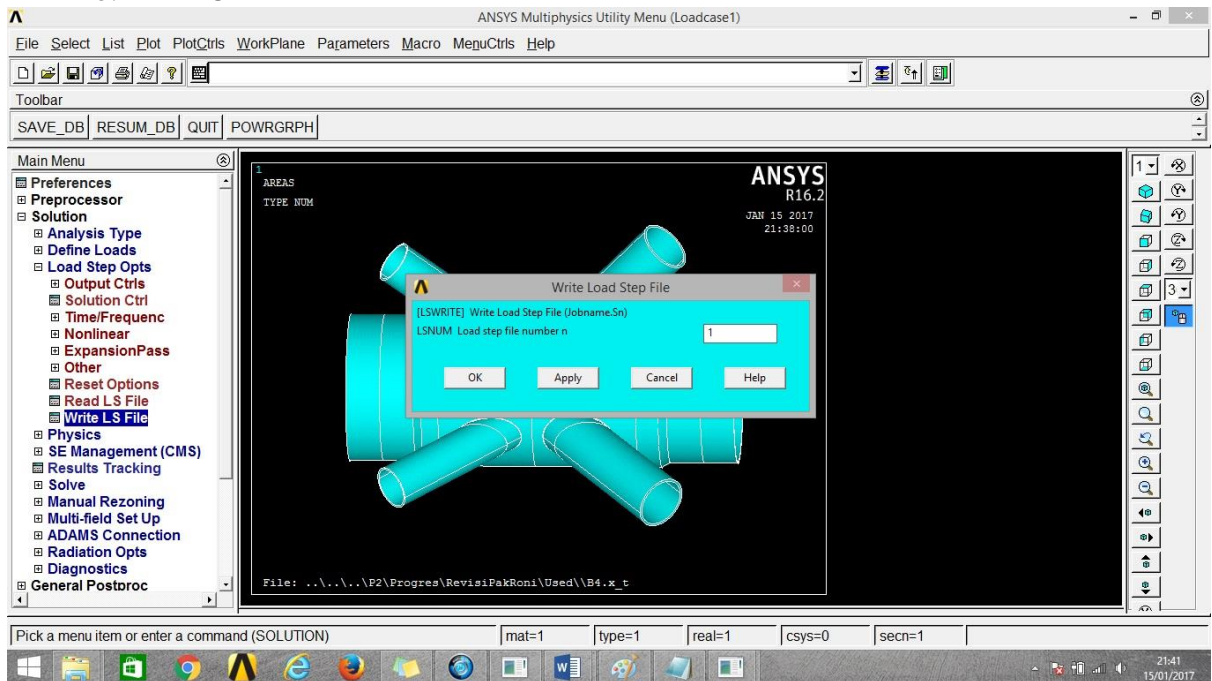
f. Klik OK



13. Main menu → Pilih Solution → Loadstep Opts → Write LS File

a. Isi kolom “LSWRITE” dengan nomor urut Loadstep

b. Klik OK



14. Lakukan kembali langkah 7 sampai 13 untuk semua Loadstep secara seksama dan berurutan

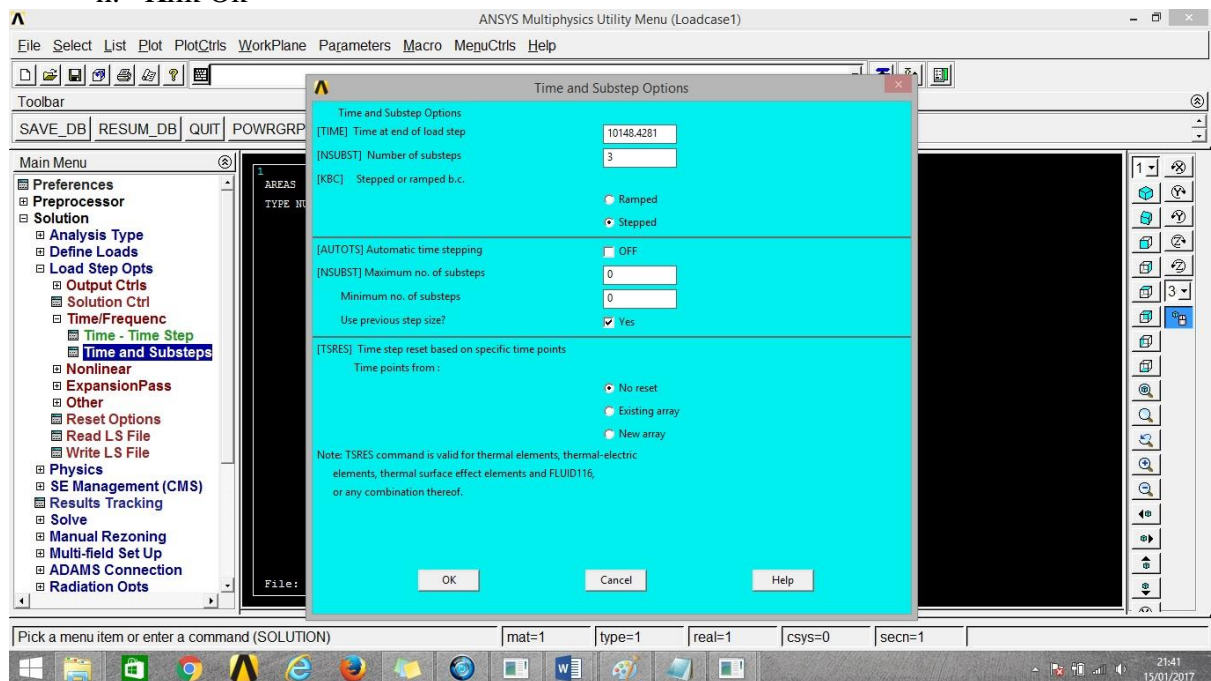
➤ Contoh Folder notepad untuk Loadstep 1 sampai terakhir

➤

15. Selanjutnya lakukan Proses pendinginan pilih Main menu → Pilih Solution → Loadstep Opts → Time/Frequeunc → pilih Time and Substeps

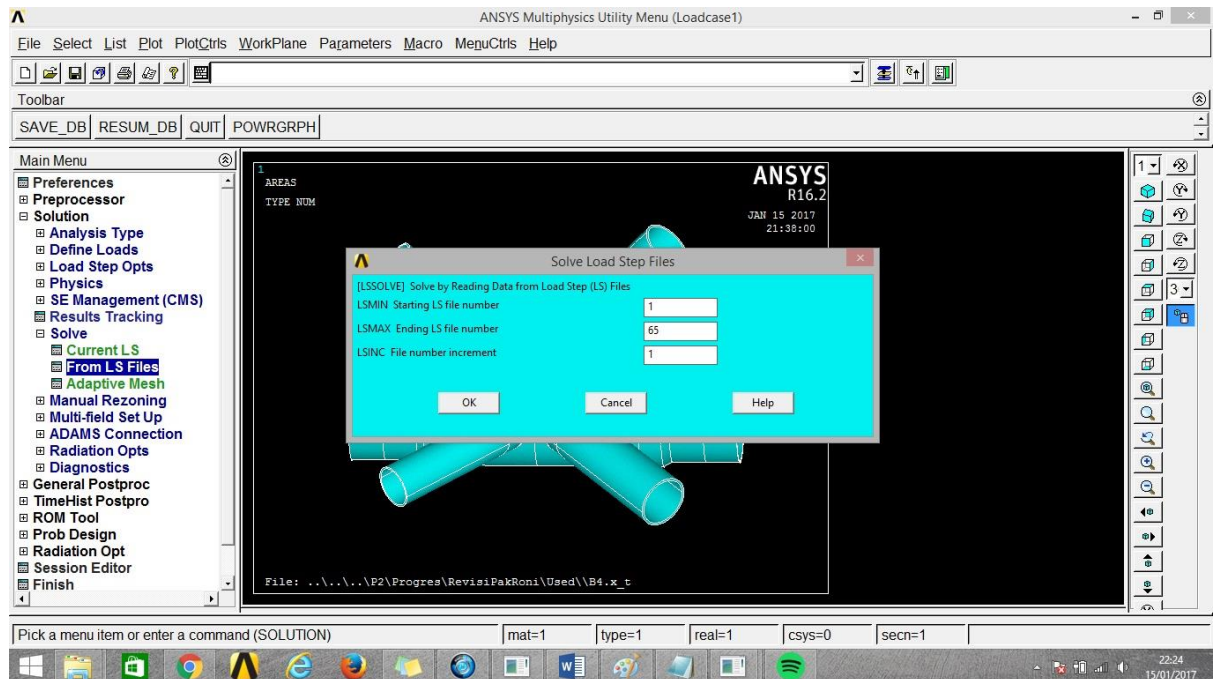


- Isi kolom "TIME" dengan jumlah waktu yang dibutuhkan untuk mendinginkan proses pengelasan secara keseluruhan dengan waktu tertentu (beberapa jam)
- Isi kolom "NSUBST (Number of substep)"
- Check "Stepped"
- Check "AUTOTS" pada kondisi "OFF"
- Pastikan "TSRES" dalam kondisi "No reset"
- Klik OK
- Kemudian kembali ke ➔ Loadstep Opts ➔ pilih Write LS File ➔ isi kolom "LSWRITE" dengan jumlah Loadstep yang akan didinginkan (sebaiknya melebihi jumlah Loadstep yang akan didinginkan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik)
- Klik Ok



# 16. Main menu ➔ Solution ➔ Solve ➔ pilih From LS File

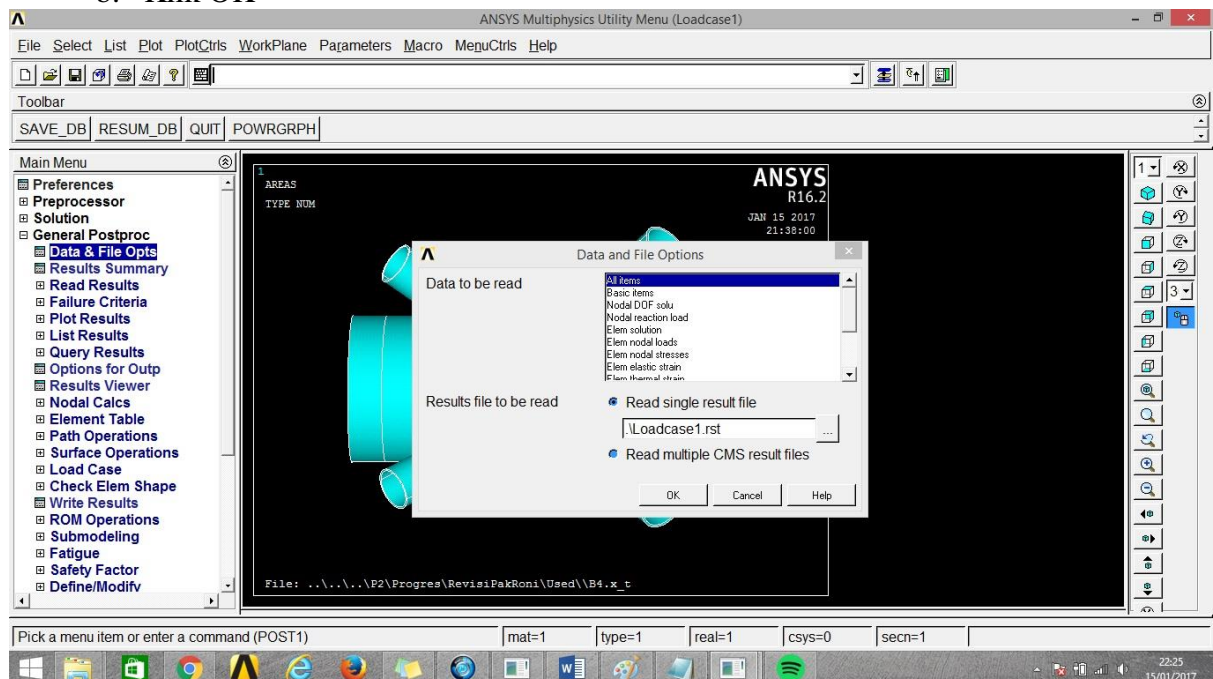
- Isi kolom "LSSOLVE" pada LSMIN masukkan nomor awal Loadstep
- LSMAX masukkan nomor akhir Loadstep
- LSINC default increment 1
- Klik OK



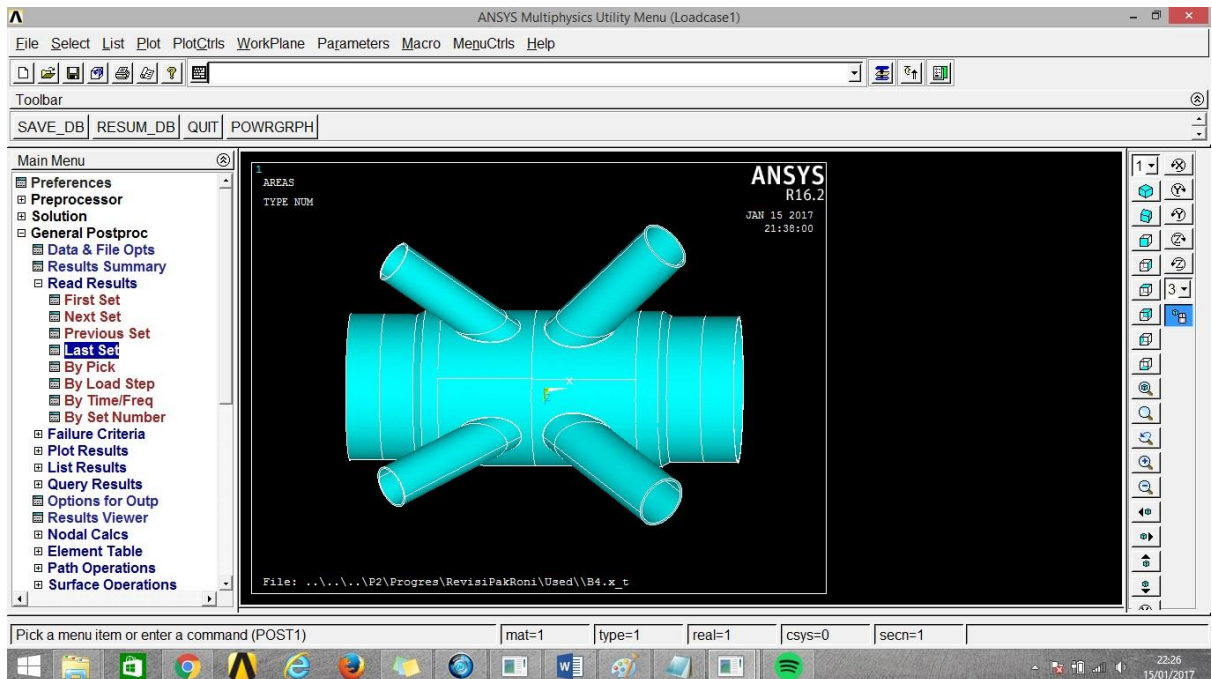
**NB : Tunggu sampai running selesai, selanjutnya Save DB hasil running**

17. Untuk melihat hasil running pilih Main menu → General Postproc → Data & File Opts

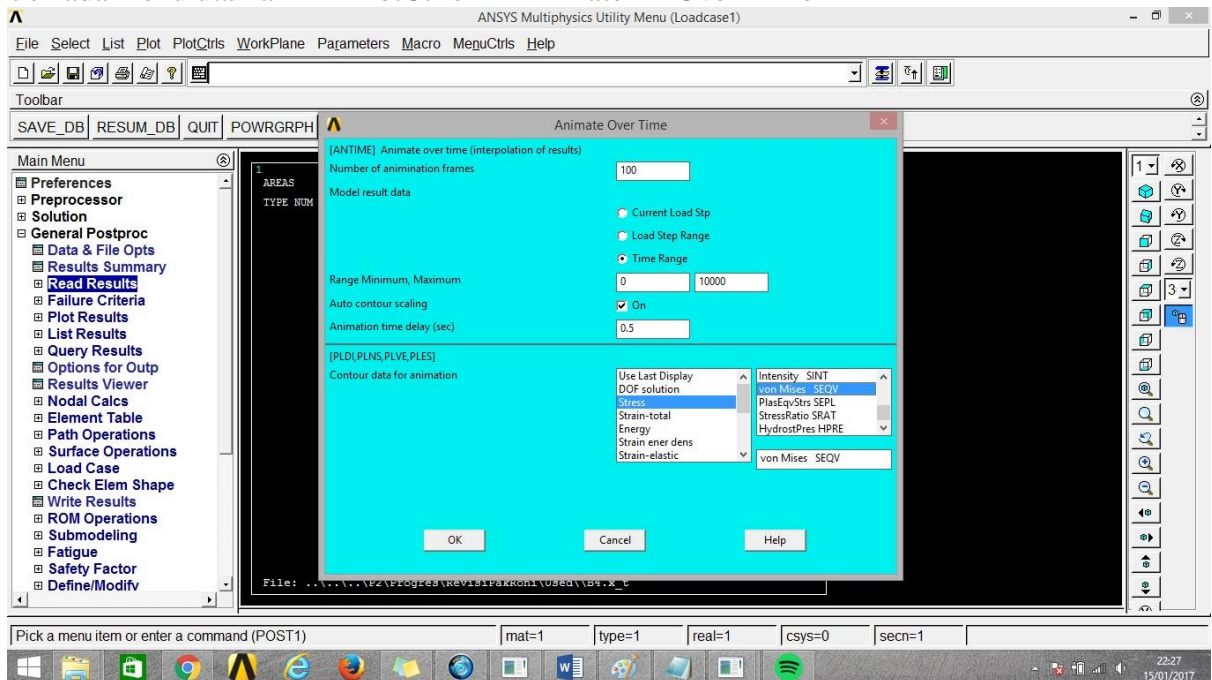
- Browse “file rst”
- Klik OK



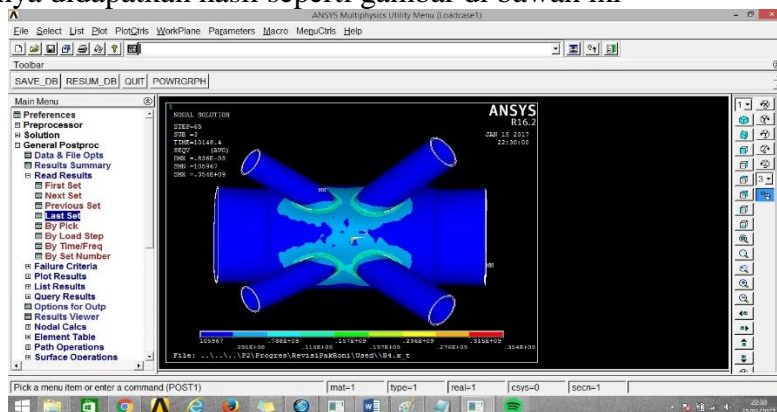
18. Kemudian untuk melihat simulasi stress pada spesimen pilih Main menu → General Postproc → Read Result → pilih Last Set



19. Pada menu utama Pilih PlotCtrls → Animate → Over Time



20. Selanjutnya didapatkan hasil seperti gambar di bawah ini



## **LAMPIRAN C**

### **INPUT FILE ANALISA TERMAL PADA *SOFTWARE* ANSYS MECHANICAL APDL 16.2**

FLST,2,160,5,ORDE,30

FITEM,2,3

FITEM,2,5

FITEM,2,7

FITEM,2,-8

FITEM,2,16

FITEM,2,25

FITEM,2,39

FITEM,2,-55

FITEM,2,58

FITEM,2,-59

FITEM,2,62

FITEM,2,-83

FITEM,2,86

FITEM,2,-87

FITEM,2,92

FITEM,2,-111

FITEM,2,114

FITEM,2,-115

FITEM,2,120

FITEM,2,-139

FITEM,2,142

FITEM,2,-143

FITEM,2,148

FITEM,2,-150

FITEM,2,154

FITEM,2,161

FITEM,2,167

FITEM,2,172

FITEM,2,175

FITEM,2,-234

/GO

!\*

SFA,P51X,1,CONV,15,298

FLST,2,4,5,ORDE,4

FITEM,2,52

FITEM,2,80

FITEM,2,100

FITEM,2,130

/GO

!\*

SFA,P51X,1,HFLUX,1356607

!\*

TIME,38.1

AUTOTS,0

NSUBST,2, , ,1

KBC,1

!\*

TSRES,ERASE

LSWRITE,1,

LSCLEAR,ALL

FLST,2,160,5,ORDE,30

FITEM,2,3

FITEM,2,5

FITEM,2,7

FITEM,2,-8

FITEM,2,16

FITEM,2,25

FITEM,2,39

FITEM,2,-55

FITEM,2,58

FITEM,2,-59

FITEM,2,62	!* TIME,76.2
FITEM,2,-83	AUTOTS,0
FITEM,2,86	NSUBST,2, , ,1
FITEM,2,-87	KBC,1
FITEM,2,92	!* TSRES,ERASE
FITEM,2,-111	LSWRITE,2,
FITEM,2,114	LSCLEAR,ALL
FITEM,2,-115	FLST,2,160,5,ORDE,30
FITEM,2,120	FITEM,2,3
FITEM,2,-139	FITEM,2,5
FITEM,2,142	FITEM,2,7
FITEM,2,-143	FITEM,2,-8
FITEM,2,148	FITEM,2,16
FITEM,2,-150	FITEM,2,25
FITEM,2,154	FITEM,2,39
FITEM,2,161	FITEM,2,-55
FITEM,2,167	FITEM,2,58
FITEM,2,172	FITEM,2,-59
FITEM,2,175	FITEM,2,62
FITEM,2,-234	FITEM,2,-83
/GO	FITEM,2,86
!* SFA,P51X,1,CONV,15,298	FITEM,2,-87
FLST,2,4,5,ORDE,4	FITEM,2,92
FITEM,2,51	FITEM,2,-111
FITEM,2,81	FITEM,2,114
FITEM,2,99	FITEM,2,-115
FITEM,2,131	FITEM,2,120
/GO	FITEM,2,-139
!* SFA,P51X,1,HFLUX,1356607	FITEM,2,142

FITEM,2,-143	FITEM,2,5
FITEM,2,148	FITEM,2,7
FITEM,2,-150	FITEM,2,-8
FITEM,2,154	FITEM,2,16
FITEM,2,161	FITEM,2,25
FITEM,2,167	FITEM,2,39
FITEM,2,172	FITEM,2,-55
FITEM,2,175	FITEM,2,58
FITEM,2,-234	FITEM,2,-59
/GO	FITEM,2,62
!* SFA,P51X,1,CONV,15,298	FITEM,2,-83
FLST,2,4,5,ORDE,4	FITEM,2,86
FITEM,2,50	FITEM,2,-87
FITEM,2,82	FITEM,2,92
FITEM,2,98	FITEM,2,-111
FITEM,2,132	FITEM,2,114
/GO	FITEM,2,-115
!* SFA,P51X,1,HFLUX,1356607	FITEM,2,120
!* TIME,114.3	FITEM,2,-139
AUTOTS,0	FITEM,2,142
NSUBST,2, , ,1	FITEM,2,-143
KBC,1	FITEM,2,148
!* TSRES,ERASE	FITEM,2,-150
LSWRITE,3,	FITEM,2,154
LSCLEAR,ALL	FITEM,2,161
FLST,2,160,5,ORDE,30	FITEM,2,167
FITEM,2,3	FITEM,2,172
	FITEM,2,175
	FITEM,2,-234
	/GO
	!* 

SFA,P51X,1,CONV,15,298	FITEM,2,86
FLST,2,4,5,ORDE,4	FITEM,2,-87
FITEM,2,49	FITEM,2,92
FITEM,2,83	FITEM,2,-111
FITEM,2,97	FITEM,2,114
FITEM,2,133	FITEM,2,-115
/GO	FITEM,2,120
!* SFA,P51X,1,HFLUX,1356607	FITEM,2,-139
!* TIME,152.4	FITEM,2,142
AUTOTS,0	FITEM,2,-143
NSUBST,2, , ,1	FITEM,2,148
KBC,1	FITEM,2,-150
!* TSRES,ERASE	FITEM,2,154
LSWRITE,4,	FITEM,2,161
LSCLEAR,ALL	FITEM,2,167
FLST,2,160,5,ORDE,30	FITEM,2,172
FITEM,2,3	FITEM,2,175
FITEM,2,5	FITEM,2,-234
FITEM,2,7	/GO
FITEM,2,-8	!* SFA,P51X,1,CONV,15,298
FITEM,2,16	FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,25	FITEM,2,48
FITEM,2,39	FITEM,2,87
FITEM,2,-55	FITEM,2,115
FITEM,2,58	FITEM,2,134
FITEM,2,-59	/GO
FITEM,2,62	!* SFA,P51X,1,HFLUX,1356607
FITEM,2,-83	!* TIME,190.5



AUTOTS,0	FITEM,2,-150
NSUBST,2, , ,1	FITEM,2,154
KBC,1	FITEM,2,161
!* TSRES,ERASE	FITEM,2,167
LSWRITE,5,	FITEM,2,172
LSCLEAR,ALL	FITEM,2,175
FLST,2,160,5,ORDE,30	FITEM,2,-234
FITEM,2,3	/GO
FITEM,2,5	!* SFA,P51X,1,CONV,15,298
FITEM,2,7	FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,-8	FITEM,2,47
FITEM,2,16	FITEM,2,69
FITEM,2,25	FITEM,2,111
FITEM,2,39	FITEM,2,135
FITEM,2,-55	/GO
FITEM,2,58	!* SFA,P51X,1,HFLUX,1356607
FITEM,2,-59	!* TIME,228.6
FITEM,2,62	AUTOTS,0
FITEM,2,-83	NSUBST,2, , ,1
FITEM,2,86	KBC,1
FITEM,2,-87	!* TSRES,ERASE
FITEM,2,92	LSWRITE,6,
FITEM,2,-111	LSCLEAR,ALL
FITEM,2,114	FLST,2,160,5,ORDE,30
FITEM,2,-115	FITEM,2,3
FITEM,2,120	FITEM,2,5
FITEM,2,-139	FITEM,2,7
FITEM,2,142	
FITEM,2,-143	
FITEM,2,148	

FITEM,2,-8  
FITEM,2,16  
FITEM,2,25  
FITEM,2,39  
FITEM,2,-55  
FITEM,2,58  
FITEM,2,-59  
FITEM,2,62  
FITEM,2,-83  
FITEM,2,86  
FITEM,2,-87  
FITEM,2,92  
FITEM,2,-111  
FITEM,2,114  
FITEM,2,-115  
FITEM,2,120  
FITEM,2,-139  
FITEM,2,142  
FITEM,2,-143  
FITEM,2,148  
FITEM,2,-150  
FITEM,2,154  
FITEM,2,161  
FITEM,2,167  
FITEM,2,172  
FITEM,2,175  
FITEM,2,-234  
/GO  
!\*  
SFA,P51X,1,CONV,15,298  
FLST,2,4,5,ORDE,4

FITEM,2,46  
FITEM,2,70  
FITEM,2,110  
FITEM,2,136  
/GO  
!\*  
SFA,P51X,1,HFLUX,1356607  
!\*  
TIME,266.7  
AUTOTS,0  
NSUBST,2, , ,1  
KBC,1  
!\*  
TSRES,ERASE  
LSWRITE,7,  
LSCLEAR,ALL  
FLST,2,160,5,ORDE,30  
FITEM,2,3  
FITEM,2,5  
FITEM,2,7  
FITEM,2,-8  
FITEM,2,16  
FITEM,2,25  
FITEM,2,39  
FITEM,2,-55  
FITEM,2,58  
FITEM,2,-59  
FITEM,2,62  
FITEM,2,-83  
FITEM,2,86  
FITEM,2,-87

FITEM,2,92	KBC,1
FITEM,2,-111	!*
FITEM,2,114	TSRES,ERASE
FITEM,2,-115	LSWRITE,8,
FITEM,2,120	LSCLEAR,ALL
FITEM,2,-139	FLST,2,160,5,ORDE,30
FITEM,2,142	FITEM,2,3
FITEM,2,-143	FITEM,2,5
FITEM,2,148	FITEM,2,7
FITEM,2,-150	FITEM,2,-8
FITEM,2,154	FITEM,2,16
FITEM,2,161	FITEM,2,25
FITEM,2,167	FITEM,2,39
FITEM,2,172	FITEM,2,-55
FITEM,2,175	FITEM,2,58
FITEM,2,-234	FITEM,2,-59
/GO	FITEM,2,62
!*	FITEM,2,-83
SFA,P51X,1,CONV,15,298	FITEM,2,86
FLST,2,4,5,ORDE,4	FITEM,2,-87
FITEM,2,45	FITEM,2,92
FITEM,2,71	FITEM,2,-111
FITEM,2,109	FITEM,2,114
FITEM,2,137	FITEM,2,-115
/GO	FITEM,2,120
!*	FITEM,2,-139
SFA,P51X,1,HFLUX,1356607	FITEM,2,142
!*	FITEM,2,-143
TIME,304.8	FITEM,2,148
AUTOTS,0	FITEM,2,-150
NSUBST,2, , ,1	FITEM,2,154

FITEM,2,161	FITEM,2,25
FITEM,2,167	FITEM,2,39
FITEM,2,172	FITEM,2,-55
FITEM,2,175	FITEM,2,58
FITEM,2,-234	FITEM,2,-59
/GO	FITEM,2,62
!* SFA,P51X,1,CONV,15,298	FITEM,2,-83
FLST,2,4,5,ORDE,4	FITEM,2,86
FITEM,2,44	FITEM,2,-87
FITEM,2,72	FITEM,2,92
FITEM,2,108	FITEM,2,-111
FITEM,2,138	FITEM,2,114
/GO	FITEM,2,-115
!* SFA,P51X,1,HFLUX,1356607	FITEM,2,120
!* TIME,342.9	FITEM,2,-139
AUTOTS,0	FITEM,2,142
NSUBST,2, , ,1	FITEM,2,-143
KBC,1	FITEM,2,148
!* TSRES,ERASE	FITEM,2,-150
LSWRITE,9,	FITEM,2,154
LSCLEAR,ALL	FITEM,2,161
FLST,2,160,5,ORDE,30	FITEM,2,167
FITEM,2,3	FITEM,2,172
FITEM,2,5	FITEM,2,175
FITEM,2,7	FITEM,2,-234
FITEM,2,-8	/GO
FITEM,2,16	!* SFA,P51X,1,CONV,15,298
	FLST,2,4,5,ORDE,4
	FITEM,2,43
	FITEM,2,73

FITEM,2,107	FITEM,2,114
FITEM,2,139	FITEM,2,-115
/GO	FITEM,2,120
!* SFA,P51X,1,HFLUX,1356607	FITEM,2,-139
!* TIME,381	FITEM,2,142
AUTOTS,0	FITEM,2,-143
NSUBST,2, , ,1	FITEM,2,148
KBC,1	FITEM,2,-150
!* TSRES,ERASE	FITEM,2,154
LSWRITE,10,	FITEM,2,161
LSCLEAR,ALL	FITEM,2,167
FLST,2,160,5,ORDE,30	FITEM,2,172
FITEM,2,3	FITEM,2,175
FITEM,2,5	FITEM,2,-234
FITEM,2,7	/GO
FITEM,2,-8	!* SFA,P51X,1,CONV,15,298
FITEM,2,16	FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,25	FITEM,2,42
FITEM,2,39	FITEM,2,74
FITEM,2,-55	FITEM,2,106
FITEM,2,58	FITEM,2,143
FITEM,2,-59	/GO
FITEM,2,62	!* SFA,P51X,1,HFLUX,1356607
FITEM,2,-83	!* TIME,419.1
FITEM,2,86	AUTOTS,0
FITEM,2,-87	NSUBST,2, , ,1
FITEM,2,92	KBC,1
FITEM,2,-111	!* TIME,419.1

TSRES,ERASE  
LSWRITE,11,  
LSCLEAR,ALL  
FLST,2,160,5,ORDE,30  
FITEM,2,3  
FITEM,2,5  
FITEM,2,7  
FITEM,2,-8  
FITEM,2,16  
FITEM,2,25  
FITEM,2,39  
FITEM,2,-55  
FITEM,2,58  
FITEM,2,-59  
FITEM,2,62  
FITEM,2,-83  
FITEM,2,86  
FITEM,2,-87  
FITEM,2,92  
FITEM,2,-111  
FITEM,2,114  
FITEM,2,-115  
FITEM,2,120  
FITEM,2,-139  
FITEM,2,142  
FITEM,2,-143  
FITEM,2,148  
FITEM,2,-150  
FITEM,2,154  
FITEM,2,161  
FITEM,2,167

FITEM,2,172  
FITEM,2,175  
FITEM,2,-234  
/GO  
!\*  
SFA,P51X,1,CONV,15,298  
FLST,2,4,5,ORDE,4  
FITEM,2,41  
FITEM,2,75  
FITEM,2,105  
FITEM,2,125  
/GO  
!\*  
SFA,P51X,1,HFLUX,1356607  
!\*  
TIME,457.2  
AUTOTS,0  
NSUBST,2, , ,1  
KBC,1  
!\*  
TSRES,ERASE  
LSWRITE,12,  
LSCLEAR,ALL  
FLST,2,160,5,ORDE,30  
FITEM,2,3  
FITEM,2,5  
FITEM,2,7  
FITEM,2,-8  
FITEM,2,16  
FITEM,2,25  
FITEM,2,39

FITEM,2,-55	/GO
FITEM,2,58	!*
FITEM,2,-59	SFA,P51X,1,HFLUX,1356607
FITEM,2,62	!*
FITEM,2,-83	TIME,495.3
FITEM,2,86	AUTOTS,0
FITEM,2,-87	NSUBST,2, , ,1
FITEM,2,92	KBC,1
FITEM,2,-111	!*
FITEM,2,114	TSRES,ERASE
FITEM,2,-115	LSWRITE,13,
FITEM,2,120	LSCLEAR,ALL
FITEM,2,-139	FLST,2,160,5,ORDE,30
FITEM,2,142	FITEM,2,3
FITEM,2,-143	FITEM,2,5
FITEM,2,148	FITEM,2,7
FITEM,2,-150	FITEM,2,-8
FITEM,2,154	FITEM,2,16
FITEM,2,161	FITEM,2,25
FITEM,2,167	FITEM,2,39
FITEM,2,172	FITEM,2,-55
FITEM,2,175	FITEM,2,58
FITEM,2,-234	FITEM,2,-59
/GO	FITEM,2,62
!*	FITEM,2,-83
SFA,P51X,1,CONV,15,298	FITEM,2,86
FLST,2,4,5,ORDE,4	FITEM,2,-87
FITEM,2,59	FITEM,2,92
FITEM,2,76	FITEM,2,-111
FITEM,2,104	FITEM,2,114
FITEM,2,126	FITEM,2,-115

FITEM,2,120	LSCLEAR,ALL
FITEM,2,-139	FLST,2,160,5,ORDE,30
FITEM,2,142	FITEM,2,3
FITEM,2,-143	FITEM,2,5
FITEM,2,148	FITEM,2,7
FITEM,2,-150	FITEM,2,-8
FITEM,2,154	FITEM,2,16
FITEM,2,161	FITEM,2,25
FITEM,2,167	FITEM,2,39
FITEM,2,172	FITEM,2,-55
FITEM,2,175	FITEM,2,58
FITEM,2,-234	FITEM,2,-59
/GO	FITEM,2,62
!* SFA,P51X,1,CONV,15,298	FITEM,2,-83
FLST,2,4,5,ORDE,4	FITEM,2,86
FITEM,2,55	FITEM,2,-87
FITEM,2,77	FITEM,2,92
FITEM,2,103	FITEM,2,-111
FITEM,2,127	FITEM,2,114
/GO	FITEM,2,-115
!* SFA,P51X,1,HFLUX,1356607	FITEM,2,120
!* TIME,533.4	FITEM,2,-139
AUTOTS,0	FITEM,2,142
NSUBST,2, , ,1	FITEM,2,-143
KBC,1	FITEM,2,148
!* TSRES,ERASE	FITEM,2,-150
LSWRITE,14,	FITEM,2,154
	FITEM,2,161
	FITEM,2,167
	FITEM,2,172
	FITEM,2,175



FITEM,2,-234	FITEM,2,-59
/GO	FITEM,2,62
!* SFA,P51X,1,CONV,15,298	FITEM,2,-83
FLST,2,4,5,ORDE,4	FITEM,2,86
FITEM,2,54	FITEM,2,-87
FITEM,2,78	FITEM,2,92
FITEM,2,102	FITEM,2,-111
FITEM,2,128	FITEM,2,114
/GO	FITEM,2,-115
!* SFA,P51X,1,HFLUX,1356607	FITEM,2,120
!* TIME,571.5	FITEM,2,-139
AUTOTS,0	FITEM,2,142
NSUBST,2, , ,1	FITEM,2,-143
KBC,1	FITEM,2,148
!* TSRES,ERASE	FITEM,2,-150
LSWRITE,15,	FITEM,2,154
LSCLEAR,ALL	FITEM,2,161
FLST,2,160,5,ORDE,30	FITEM,2,167
FITEM,2,3	FITEM,2,172
FITEM,2,5	FITEM,2,175
FITEM,2,7	FITEM,2,-234
FITEM,2,-8	/GO
FITEM,2,16	!* SFA,P51X,1,CONV,15,298
FITEM,2,25	FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,39	FITEM,2,53
FITEM,2,-55	FITEM,2,79
FITEM,2,58	FITEM,2,101
	FITEM,2,129
	/GO
	!* SFA,P51X,1,CONV,15,298

SFA,P51X,1,HFLUX,1356607

!\*  
.

TIME,609.6

AUTOTS,0

NSUBST,2, , ,1

KBC,1

!\*  
.

TSRES,ERASE

LSWRITE,16,

LSCLEAR,ALL

**LAMPIRAN D**

**INPUT FILE ANALISA STRUCTURAL PADA  
*SOFTWARE* ANSYS MECHANICAL APDL 16.2**

LDREAD,TEMP,1,LAST,	,	KBC,1
, 'Loadcase4','rth',' '		!*
!*		TSRES,ERASE
OUTPR,ALL,ALL,		LSWRITE,2,
/GST,1		LDREAD,TEMP,3,LAST,
!*		, 'Loadcase4','rth',' '
OUTRES,ALL,ALL,		!*
!*		OUTPR,ALL,ALL,
SOLCONTROL,OFF, ,NOPL		/GST,1
!*		!*
!*		OUTRES,ALL,ALL,
TIME,38.1		!*
AUTOTS,0		SOLCONTROL,OFF, ,NOPL
NSUBST,3,0,0,1		!*
KBC,1		!*
!*		TIME,114.3
TSRES,ERASE		AUTOTS,0
LSWRITE,1,		NSUBST,3,0,0,1
LDREAD,TEMP,2,LAST,	,	KBC,1
, 'Loadcase4','rth',' '		!*
!*		TSRES,ERASE
OUTPR,ALL,ALL,		LSWRITE,3,
/GST,1		LDREAD,TEMP,4,LAST,
!*		, 'Loadcase4','rth',' '
OUTRES,ALL,ALL,		!*
!*		OUTPR,ALL,ALL,
SOLCONTROL,OFF, ,NOPL		/GST,1
!*		!*
!*		OUTRES,ALL,ALL,
TIME,76.2		!*
AUTOTS,0		SOLCONTROL,OFF, ,NOPL
NSUBST,3,0,0,1		!*

!\*  
TIME,152.4  
AUTOTS,0  
NSUBST,3,0,0,1  
KBC,1  
!\*  
TSRES,ERASE  
LSWRITE,4,  
LDREAD,TEMP,5,LAST, ,  
, 'Loadcase4', 'rth', ' '  
!\*  
OUTPR,ALL,ALL,  
/GST,1  
!\*  
OUTRES,ALL,ALL,  
!\*  
SOLCONTROL,OFF, ,NOPL  
!\*  
!\*  
TIME,190.5  
AUTOTS,0  
NSUBST,3,0,0,1  
KBC,1  
!\*  
TSRES,ERASE  
LSWRITE,5,  
LDREAD,TEMP,6,LAST, ,  
, 'Loadcase4', 'rth', ' '  
!\*  
OUTPR,ALL,ALL,  
/GST,1  
!\*  
!

OUTRES,ALL,ALL,  
!\*  
SOLCONTROL,OFF, ,NOPL  
!\*  
!\*  
TIME,228.6  
AUTOTS,0  
NSUBST,3,0,0,1  
KBC,1  
!\*  
TSRES,ERASE  
LSWRITE,6,  
LDREAD,TEMP,7,LAST, ,  
, 'Loadcase4', 'rth', ' '  
!\*  
OUTPR,ALL,ALL,  
/GST,1  
!\*  
OUTRES,ALL,ALL,  
!\*  
SOLCONTROL,OFF, ,NOPL  
!\*  
!\*  
TIME,266.7  
AUTOTS,0  
NSUBST,3,0,0,1  
KBC,1  
!\*  
TSRES,ERASE  
LSWRITE,7,  
LDREAD,TEMP,8,LAST, ,  
, 'Loadcase4', 'rth', ' '

!* OUTPR,ALL,ALL, /GST,1 !* OUTRES,ALL,ALL, !* SOLCONTROL,OFF, ,NOPL !* !* TIME,304.8 AUTOTS,0 NSUBST,3,0,0,1 KBC,1 !* TSRES,ERASE LSWRITE,8, LDREAD,TEMP,9,LAST, , , 'Loadcase4', 'rth', ' ' !* OUTPR,ALL,ALL, /GST,1 !* OUTRES,ALL,ALL, !* SOLCONTROL,OFF, ,NOPL !* !* TIME,342.9 AUTOTS,0 NSUBST,3,0,0,1 KBC,1 !* !	TSRES,ERASE LSWRITE,9, LDREAD,TEMP,10,LAST, , , 'Loadcase4', 'rth', ' ' !* OUTPR,ALL,ALL, /GST,1 !* OUTRES,ALL,ALL, !* SOLCONTROL,OFF, ,NOPL !* !* TIME,381 AUTOTS,0 NSUBST,3,0,0,1 KBC,1 !* TSRES,ERASE LSWRITE,10, LDREAD,TEMP,11,LAST, , , 'Loadcase4', 'rth', ' ' !* OUTPR,ALL,ALL, /GST,1 !* OUTRES,ALL,ALL, !* SOLCONTROL,OFF, ,NOPL !* !* TIME,419.1
--	--

AUTOTS,0  
 NSUBST,3,0,0,1  
 KBC,1  
 !\*  
 TSRES,ERASE  
 LSWRITE,11,  
 LDREAD,TEMP,12,LAST, ,  
 , 'Loadcase4', 'rth', ' '  
 !\*  
 OUTPR,ALL,ALL,  
 /GST,1  
 !\*  
 OUTRES,ALL,ALL,  
 !\*  
 SOLCONTROL,OFF, ,NOPL  
 !\*  
 !\*  
 TIME,457.2  
 AUTOTS,0  
 NSUBST,3,0,0,1  
 KBC,1  
 !\*  
 TSRES,ERASE  
 LSWRITE,12,  
 LDREAD,TEMP,13,LAST, ,  
 , 'Loadcase4', 'rth', ' '  
 !\*  
 OUTPR,ALL,ALL,  
 /GST,1  
 !\*  
 OUTRES,ALL,ALL,  
 !\*


SOLCONTROL,OFF, ,NOPL  
 !\*  
 !\*  
 TIME,495.3  
 AUTOTS,0  
 NSUBST,3,0,0,1  
 KBC,1  
 !\*  
 TSRES,ERASE  
 LSWRITE,13,  
 LDREAD,TEMP,14,LAST, ,  
 , 'Loadcase4', 'rth', ' '  
 !\*  
 OUTPR,ALL,ALL,  
 /GST,1  
 !\*  
 OUTRES,ALL,ALL,  
 !\*  
 SOLCONTROL,OFF, ,NOPL  
 !\*  
 !\*  
 TIME,533.4  
 AUTOTS,0  
 NSUBST,3,0,0,1  
 KBC,1  
 !\*  
 TSRES,ERASE  
 LSWRITE,14,  
 LDREAD,TEMP,15,LAST, ,  
 , 'Loadcase4', 'rth', ' '  
 !\*  
 OUTPR,ALL,ALL,

/GST,1  
!\*  
OUTRES,ALL,ALL,  
!\*  
SOLCONTROL,OFF, ,NOPL  
!\*  
!\*  
TIME,571.5  
AUTOTS,0  
NSUBST,3,0,0,1  
KBC,1  
!\*  
TSRES,ERASE  
LSWRITE,15,  
LDREAD,TEMP,16,LAST, ,  
, 'Loadcase4', 'rth', ' '  
!\*  
OUTPR,ALL,ALL,  
/GST,1  
!\*  
OUTRES,ALL,ALL,  
!\*  
SOLCONTROL,OFF, ,NOPL  
!\*  
!\*  
TIME,609.6  
AUTOTS,0  
NSUBST,3,0,0,1  
KBC,1  
!\*  
TSRES,ERASE  
LSWRITE,16,



## **LAMPIRAN E**

### **DATA PARAMETER PENGELASAN BERDASARKAN *WELDING PROCEDURE SPESIFICATION (WPS)***

 PT. GUNANUSA UTAMA FABRICATORS	<b>WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)</b> <b>1112 / WPS / G / 15</b>  STANDARD & CODE : AWS D1.1 2010 Edition CLIENT SPECIFICATION : 2009 F	DATE : 15 October, 2015 PROJECT : Daman Development Project CLIENT : ONGC  SUPPORTING PQR No. : 1111 / WPQTR / G / 15 1111-1 / WPQTR / G / 15 1112-3 / WPQTR / G / 15
--	--	---

Welding Process (es) : SMAW - FCAW

Type : MANUAL - SEMI AUTOMATIC

**JOINT DESIGN USED**

Type : SINGLE BEVEL

Single side welding ☒ Double side welding ☐

Backing : Yes ☐ No ☐

Backing material : N/A

Root Opening : 3 - 7 mm Root Face Dimension 0 - 2 mm

Groove Angle : 15° up to 90°

Back Gouging : Yes ☐ No ☒

**POSITION**

Position of Groove : TKY

Fillet : N/A

Vertical Progression : Up ☒ Down ☐

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

Current : AC ☐ DCEP ☒ DCEN ☒ Pulsed ☐

Other

**BASE METALS**

Material Spec. : API 2H 50 and Equivalence Material

Type : 22-2Z, 2Z-2D, 2Z-2C, 2Z-2B, 2D-2C, 2D-2B, 2D-1D

2D-1C, 2D-1B, 2D-1A

AWS Group No. : Group II to Group II

Manufacturing process : Normalized to Normalized

Thickness : Groove : 16 up to Unlimited

Diameter (Pipe) : > 20"

**FILLER METAL** SMAW FCAW

AWS Specification A 5.1 A 5.20

AWS Classification E 7016-1 E 71T-9C-J

Trade name Nippon Steel

**Tungsten Electrode (GTAW)**

Size : N/A

Type : N/A

**TECHNIQUE**

Stringer or Weave Bead STRING & WEAVE (2.5 x Electrode Diameter)

Multi pass or Single pass (per side) MULTIPASS

Number of Electrode Single Longitudinal -

Lateral -

Angle -

Wire Feed Speed (in / Min) : 215 - 230 in / min

Contact Tube to Work Distance : 15 - 25 mm

Interpass Cleaning : GRINDING AND / OR BRUSHING

**POSTWELD HEAT TREATMENT**

Temperature N/A

Time N/A

**SHIELDING**

Flux N/A Gas CO<sub>2</sub>

Composition 99.8%

Electrode-Flux (Class) N/A Flow Rate 20 - 25 L / Min

Gas Cup Size 20 mm

**PREHEAT**

Preheat Temp. Min. 3 mm < Thk ≤ 38 mm : ambient Temp.

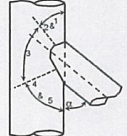
38 mm < Thk ≤ 65 mm : 65 °C

Thk > 65 mm : 110 °C

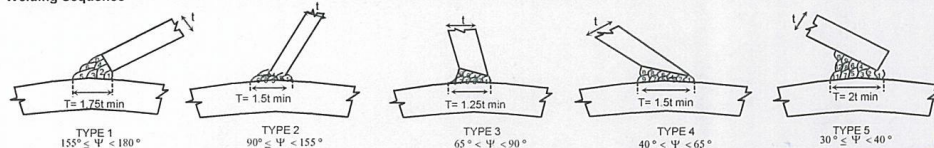
Interpass Temp. Min same as preheat temp. Max. 250 °C

Method of Preheat : Flame Torch, Method of Measurement: Digital Thermometer/Temple Stick

**WELDING PROCEDURE**

Weld pass	Process	Filler Metal		Current			Travel Speed (mm/min)	Positions	Heat Input (KJ / mm)	Joint Detail
		Class	Diam (mm)	Type & Polarity	Amps or Wire Feed Speed	Volts				
Root	SMAW	E 7016-1	3.2	DCEN	75 - 109	18 - 24	37 - 45	TKY	3.51 Max	
Hot	SMAW	E 7016-1	3.2	DCEP	95 - 136	19 - 25	108 - 132	TKY	1.57 Max	
Fill	FCAW	E 71T-9C-J	1.2	DCEP	148 - 209	20 - 26	148 - 182	TKY	1.83 Max	
Cap	FCAW	E 71T-9C-J	1.2	DCEP	148 - 209	20 - 26	178 - 227	TKY	1.52 Max	

**Welding Sequence**



PT GUNANUSA UTAMA FABRICATORS	SWIBER	TP/VELOSI	ONGC/PI	ONGC/PI
SIGN : 	SIGN : 	SIGN : 	SIGN : 	SIGN : 
NAME : Adhik Sapan R.	NAME : SYAFRUDDIN	NAME : TP/VELOSI	NAME : S. LUTAS	NAME : S. LUTAS
DATE : October 15, 2015	DATE : Nov 05, 2015	DATE : 5/11/2015	DATE : 9.11.15	DATE : 9.11.15